

17.697 /H/03



OPERASI EKONOMIS SISTEM TENAGA MENGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Oleh :

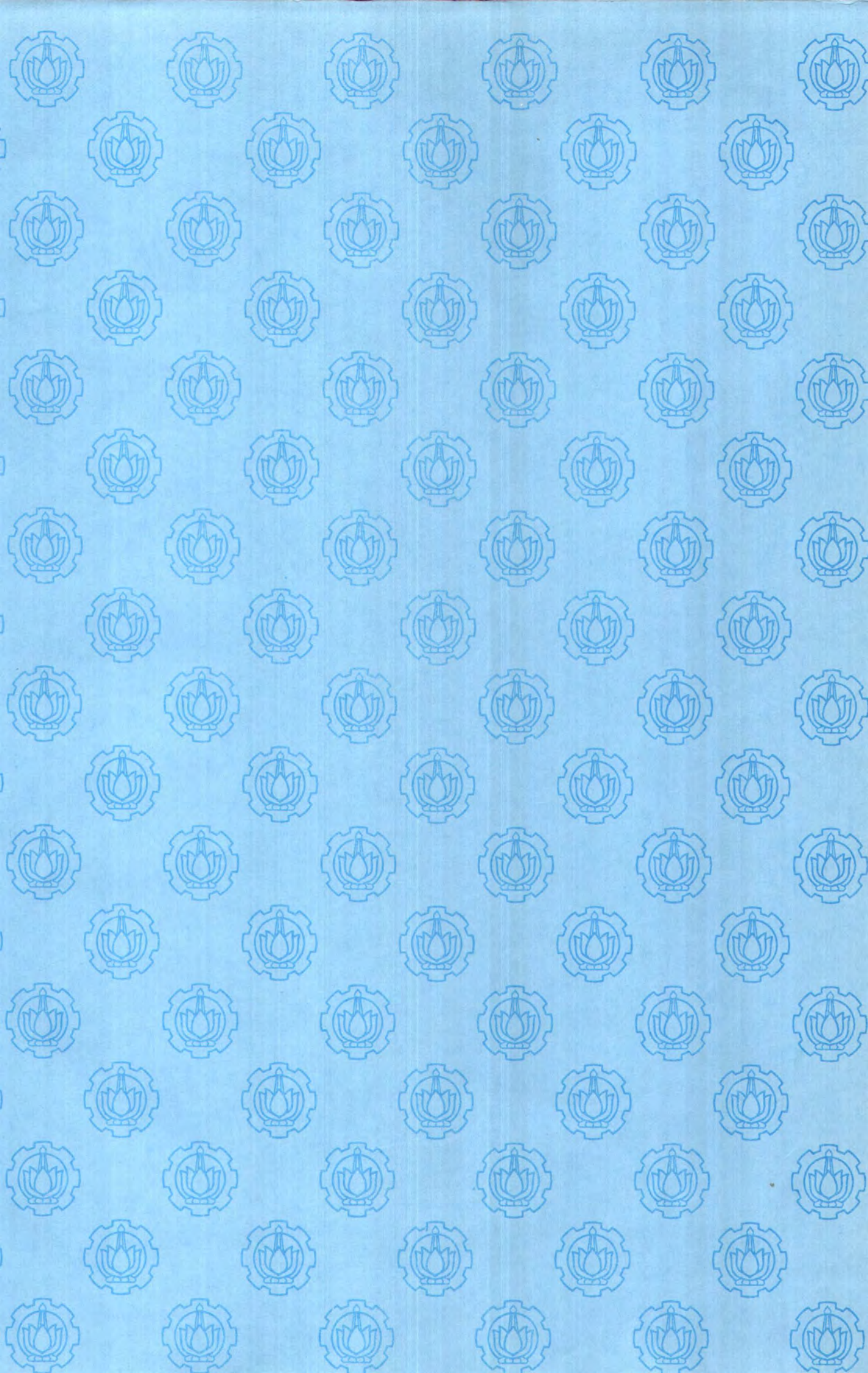
TRISNO SANYOTO
NRP. 2297201013



RT
629.89
San
0-1
2002

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA, 2002

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	22-8-2012
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	215964



OPERASI EKONOMIS SISTEM TENAGA MENGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

TRISNO SANYOTO

NRP. 22.97.201.013

Tanggal Ujian : 14 Agustus 2002
Periode Wisuda : September 2002

Disetujui oleh Tim Penguji Tesis :

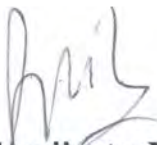
Dosen Pembimbing :



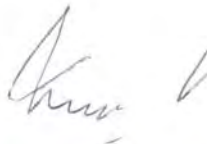
1. Ir. H. Soebagio, MSEE, Ph.D.
NIP. 130 325 607



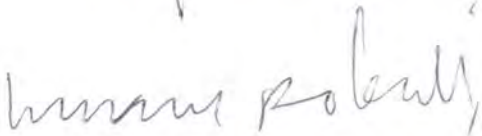
1. Ir. H. Mauridhi Herry P., M.Eng, Ph.D
NIP. 131 569 364



2. Ir. Adi Soepijanto, MT, Ph.D
NIP. 131 879 388



2. Ir. Margo Pujiantoro, MT.
NIP. 131 925 501



3. Ir. Imam Robandi, MT, Ph.D
NIP. 131 918 687

Direktur Program Pascasarjana



Ir. Sekartedjo, M.Sc., Ph.D
NIP. 130 701 281

KATA PENGANTAR

Puji syukur penyusun panjatkan kehadiran Tuhan Yang Mahaesa, karena hanya dengan rahmah dan hidayahnya penyusun dapat menyelesaikan tesis yang berjudul :

OPERASI EKONOMIS SISTEM TENAGA MENGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Penyusun menyadari bahwa sebagai hamba Allah yang tidak luput dari kesalahan dan kekhilafan, maka penyusun mengharapkan saran-saran guna penyempurnaan tulisan ini.

Dalam kesempatan ini pula penyusun menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bpk. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng, Ph.D,dan Bpk. Ir. Margo Pujiantoro, MT. selaku pembimbing yang dengan semangat tinggi mendorong dan mengarahkan penyusun hingga terselesaikannya tesis ini.
2. Bpk. Dr. Ir. Ontoseno Penangsang, selaku dosen wali penyusun
3. Bpk. Ir. Adi Soeprijanto, MT.,Ph.D., selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro ITS.

Surabaya, Agustus 2002

Penyusun

DAFTAR ISI

	HALAMAN
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Gambar	iv
Daftar Tabel	v
Abstrak	vi
Bab I Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Maksud Pembahasan Masalah	3
Bab II Teori Himpunan Fuzzy	5
2.1. Himpunan Fuzzy	5
2.2. Optimasi Fuzzy	11
Bab III Operasi Ekonomis Sistem Tenaga Listrik	15
3.1. Unit Commitment	15
3.2. Economic Dispatch	26
Bab IV Logika Fuzzy Untuk Mengakomodasi Ketidakpastian	
Beban Sistem Tenaga Listrik	33
4.1. Ketidakpastian Beban Sistem Tenaga Listrik	33
4.2. Fuzzyfikasi	36
4.3. Penurunan Algoritma Pemrograman Dinamis Fuzzy	40

Bab V Analisis	44
5.1. Data Sistem	44
5.2. Perbandingan Hasil Simulasi Pemrograman Dinamis Crisp Dengan Pemrograman Dinamis Fuzzy	45
5.3. Analisis Sensitivitas	46
Bab VI Kesimpulan	48
Daftar Pustaka	50

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR		HALAMAN
2.1.	Contoh Set Keputusan Fuzzy	13
3.1.	Karakteristik Input/output Unit Thermal	17
3.2.	Algoritma Pemrograman Dinamis Untuk Unit Commitment	23
3.3	Algoritma Perhitungan Biaya Pembangkitan dan Biaya Start up	24
3.4.	Algoritma Pemilihan State-State Feasible	25
3.5.	Pelayanan Beban L_R Oleh 1 Umit Thermal	27
3.6.	Economic Dispatch Dengan Metode Iterasi Lambda	29
3.7.	Economic Dispatch Dengan Solusi Grafik	30
3.8.	Metode Bisection	31
4.1.	Kurva Estimasi Beban Jangka Pendek	34
4.2.	Fungsi Keanggotaan Fungsi Obyektif (C)	36
4.3.	Fungsi Keanggotaan Variabel Linguistik Deviasi Beban	39
4.4.	Fungsi Keanggotaan Spinning Reserve	40
4.5.	Algoritma Pemrograman Dinamis Fuzzy	43

DAFTAR TABEL

TABEL		HALAMAN
4.1.	Diskripsi linguistic Deviasi Beban Sistem	38
4.2.	Nilai Deviasi Rata-Rata Absolut	38
5.1.	Data Kapasitas Unit Pembangkit Dan Konstanta	
	Biaya	44
5.2.	Data Beban Sistem	45
5.3.	Perbandingan Biaya Operasi Pada Simulasi Dengan	
	Pendekatan Fuzzy dan Pendekatan Crips	46

ABSTRAK

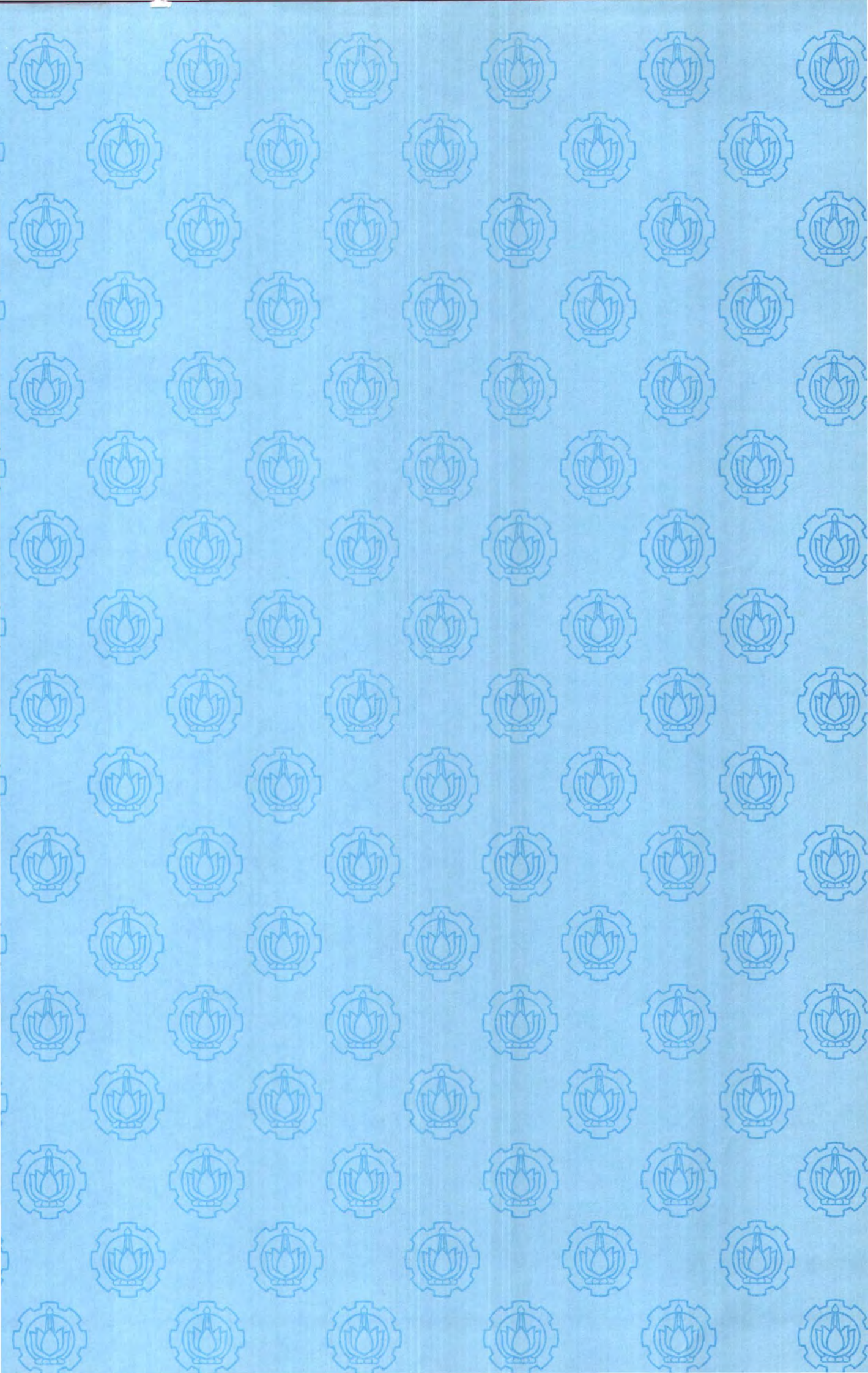
OPERASI EKONOMIS SISTEM TENAGA MENGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Oleh : Trisno Sanyoto

**Pembimbing : Ir. H. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng, Ph.D
Ir. Margo Pujiantoro, MT.**

Suatu pendekatan dengan menggunakan pemrograman dinamis fuzzy disampaikan untuk unit commitment pada pengoperasian system tenaga. Suatu gambaran karakteristik dari yang disampaikan adalah bahwa perkiraan beban tiap jam dapat diambil alih oleh suatu set himpunan fuzzy dengan membuat pendekatan utama pada pemrograman dinamis konvensional(crisp) yang mengasumsikan bahwa beban tiap jam telah diketahui secara tepat akan lebih dapat dipastikan. Untuk mencapai suatu strategi commitment yang optimal dibawah lingkup fuzzy yang didalamnya tercakup beban tiap jam, biaya operasi, sekuritas sistem melalui sebuah ekspresi dalam notasi himpunan fuzzy dikembangkan.

Kata kunci : teori himpunan fuzzy, pemrograman dinamis, unit commitment



ABSTRACT

AN APPLICATION FUZZY LOGIC TO POWER SYSTEM ECONOMIC OPERATION

By : Trisno Sanyoto

**Under Supervision : Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng, Ph.D
Ir. Margo Pujiantoro, MT.**

A new approach using fuzzy dynamic programming is proposed for the unit commitment of a power system. A characteristic feature of the presented approach is that the error in the forecasted hourly load can be taken into account by using set notations, making the approach superior to the conventional dynamic programming method which assumes that the hourly load are exactly known and there exist no error in the forecasted load. To reach an optimal commitment strategy under the fuzzy environment, a fuzzy dynamic programming model in which the hourly load, the cost, and system security are all expressed in fuzzy set notations is development.

Keywords : fuzzy set theory, dynamic programming, unit commitment

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Terdapat dua pokok permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi sistem ekonomis sistem tenaga listrik. Pertama adalah Unit Commitmen yang menentukan jadwal start up dan shut down unit-unit pembangkit dengan tujuan meminimumkan biaya start up dan shut down. Kedua adalah Economic Dispatch yang menentukan besar daya yang harus disuplai dari tiap-tiap unit pembangkit untuk memenuhi beban tertentu dengan tujuan meminimumkan biaya operasi pembangkitan. Salah satu metode yang sudah dikembangkan adalah Dynamic Programming [1,2,3].

Dynamic programming melakukan evaluasi terhadap kombinasi unit feasible yang berbeda-beda pada setiap tahap guna menentukan satu keputusan optimal. Pada setiap kombinasi feasible dihitung biaya bahan bakar dengan economic dispatch. Susut daya saluran transmisi biasanya diabaikan. Metoda ini menggunakan asumsi data beban yang telah ditentukan tiap jam. Pada kondisi awal sebelum uni-unit start up besarnya beban waktu yang akan datang ditentukan melalui estimasi beban jangka pendek. Karena beban sistem selalu bervariasi setiap saat maka akan terjadi deviasi antara hasil estimasi beban dan beban aktual sistem. Deviasi beban yang selalu bervariasi ini menyebabkan perencanaan pembangkitan daya mengalami penyimpangan, sehingga dapat terjadi over estimated atau under estimated dalam penjadwalan pembangkitan. Pengaruh deviasi beban ini harus dihindari karena dapat mengurangi tingkat keandalan sistem dan mempengaruhi biaya operasi. Pada saat

kelebihan pembangkitan daya, deviasi beban harus ditekan sehingga efisiensi biaya dapat ditingkatkan.

Selanjutnya pada tulisan ini diterapkan algoritma pemrograman dinamis fuzzy guna mengakomodasi ketidakpastian beban sistem tersebut dengan tujuan meminimisasi biaya operasi. Pendekatan logika fuzzy untuk memprediksi beban aktual sistem dilakukan dengan mempelajari kurva estimasi beban di waktu sebelumnya untuk perencanaan pembangkitan daya waktu selanjutnya[4].

Teori himpunan fuzzy, dikemukakan oleh L.A Zadeh pada tahun 1965, memberikan kemungkinan untuk mengakomodasi ketidakpastian deviasi beban sistem [5]. Secara umum teori fuzzy dikembangkan untuk menangani permasalahan yang meliputi ketidakpastian data. Teori fuzzy ini merupakan pengembangan dari konsep himpunan konvensional (crisp) yang memungkinkan proses klasifikasi dengan menggunakan bahasa natural, sehingga mendekati cara berfikir manusia.

1.2. Perumusan Masalah

Untuk meneliti keunggulan logika fuzzy pada aplikasi operasi ekonomis sistem tenaga digunakan metoda pemrograman dinamis. Metoda ini dipilih karena pemrograman dinamis memberikan solusi yang lebih baik dengan menguji setiap kombinasi dan status dari seluruh unit pembangkit secara lengkap [8]. Proses pencarian solusi optimal dengan pentahapan ke depan dengan periode waktu studi dikenal dengan istilah *stage* yang menyatakan satu jam proses optimasi. Kombinasi unit pembangkit dalam tiap stage disebut *state*.

Optimasi unit commitment dilakukan untuk unit pembangkit thermal, untuk jenis unit pembangkit yang lain di optimasi secara terpisah dan tidak dibahas dalam

tulisan ini. Fungsi obyektif biaya operasi dikelompokkan menjadi dua, yaitu biaya bahan bakar dengan representasi kurva input output yang dimodelkan dengan fungsi kuadrat, dan biaya start up. Biaya start up didekati untuk harga yang konstan dan untuk harga yang berubah terhadap waktu tidak dibahas dalam tulisan ini. Biaya shut down unit diabaikan dalam kajian ini, demikian pula biaya pemeliharaan dipisahkan dari pembahasan ini. Kriteria pembatas yang digunakan adalah minimum up time, minimum down time, batasan pembangkitan tiap unit, kendala keseimbangan pembangkitan daya dan beban, dan kendala spinning reserve.

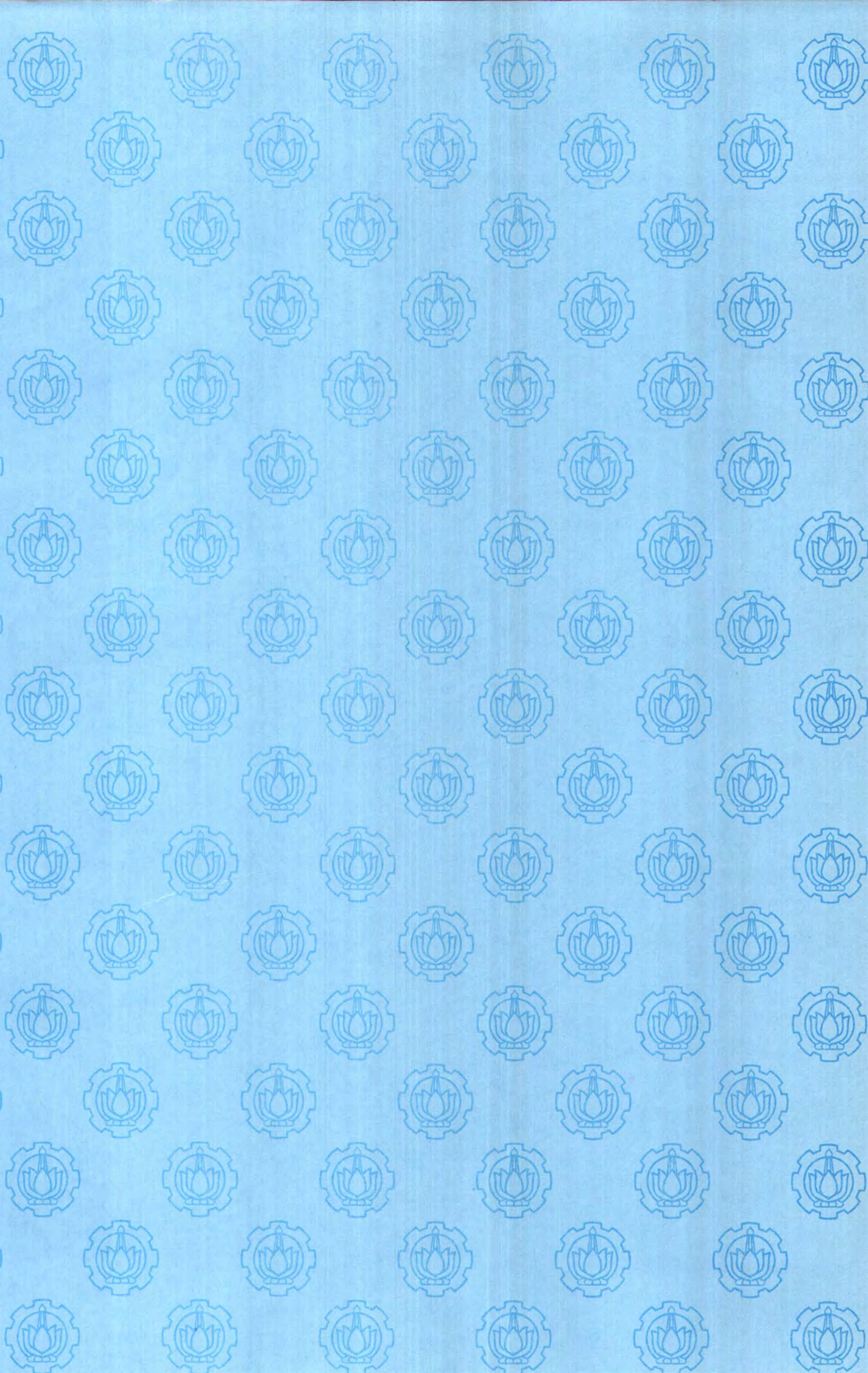
Susut daya saluran transmisi diabaikan dalam kajian ini, namun tidak menutup kemungkinan untuk dikembangkan lebih lanjut. Asumsi ini dilakukan guna mengurangi waktu komputasi karena besarnya kerangka pengamatan dalam pemrograman dinamis seiring dengan penambahan unit pembangkit yang akan dioptimasi.

1.3. Maksud Pembahasan Masalah

Pada metode pemrograman dinamis konvensional aplikasi operasi ekonomis sistem tenaga, level beban adalah crisp, sedangkan pada pemrograman dinamis fuzzy level beban adalah fuzzy. Setiap level beban memiliki nilai pembobotan tertentu dan dikelompokkan dalam group-group. Setiap group memiliki satu level beban dengan stage dan state yang sama [5]. Biaya operasi dan cadangan daya setiap state dibobot dengan fuzzyfikasi tertentu. Pengambilan keputusan optimal menggunakan operator himpunan fuzzy terhadap fungsi obyektif beban, dan cadangan daya.

Dengan memberikan beberapa level beban berdasarkan besarnya deviasi beban tiap jam dapat ditentukan level beban yang mendekati level beban aktual

sistem melalui proses optimalisasi secara fuzzy. Dengan demikian deviasi beban dapat ditekan serendah mungkin. Pengujian metodologi ini dilakukan untuk melihat perbaikan yang dapat diperoleh dibandingkan dengan metodologi konvensional.



BAB II

TEORI HIMPUNAN FUZZY

2.1. Himpunan Fuzzy ^[6]

2.1.1 Definisi

Sebuah himpunan fuzzy A dalam semesta pembicaraan (universe of discourse) $X = \{x\}$ adalah sebuah kelas kejadian dengan derajat keanggotaan (grade of membership) atau derajat kebenaran (degree of truth) atau derajat kesesuaian (grade of compatibility) yang dicirikan oleh fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ yang dihubungkan dengan setiap titik pada X oleh sebuah bilangan real dalam interval $[0,1]$ dengan nilai $\mu_A(x)$ pada x menyatakan derajat keanggotaan x dalam himpunan A .

Definisi 2.1 Himpunan Fuzzy

Apabila X merupakan semesta pembicaraan dengan anggota x , yang dinotasikan dengan $X = \{x\}$, maka himpunan fuzzy A didefinisikan sebagai sekumpulan pasangan berurutan.

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X \quad (2.1)$$

$\mu_A(x)$ menyatakan derajat keanggotaan x didalam A , yang harganya terletak pada interval $\{0,1\}$, $\mu_A(x) = 1$ menyatakan keanggotaan penuh (full membership), $\mu_A(x)=0$ menyatakan tanpa keanggotaan (non membership), sedangkan $\mu_A(x)$ antara 0 dan 1 menyatakan derajat keanggotaan di antara keanggotaan penuh dan bukan anggota.

2.1.2 Penggambaran Himpunan Fuzzy

Ada beberapa macam penggambaran himpunan fuzzy yang biasa digunakan, yaitu

1. Bentuk Pasangan Berurutan

Himpunan Fuzzy A pada semesta pembicaraan X yang anggotanya berhingga,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \mu_A(x_3)/x_3 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n$$

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.2)$$

Tanda “+” menyatakan operasi gabungan (*union*)

Jika X merupakan semesta pembicaraan yang anggotanya tak berhingga maka

himpunan fuzzy A dinyatakan dalam bentuk

$$A = \int_x \mu_A(x_i) / x \quad (2.3)$$

Tanda “ \int ” menyatakan operasi gabungan.

2. Bentuk Tabel

Pasangan nilai x dan $\mu_A(x)$ dari himpunan fuzzy A dapat dinyatakan dalam bentuk tabel dengan keduanya terletak pada baris yang sama dari dua kolom yang masing-masing menyatakan nilai x dan $\mu_A(x)$.

3. Bentuk Grafik

Pasangan nilai x dan $\mu_A(x)$ dari himpunan fuzzy A dapat dinyatakan dalam bentuk grafik dengan nilai x pada sumbu absis dan nilai $\mu_A(x)$ pada sumbu ordinat.

Penggambaran dalam bentuk grafik dari suatu himpunan fuzzy lebih menyatakan pada fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy tersebut.

Contoh 2.1

Apabila diketahui semesta pembicaraan $X = \{1,2,3,4,5,\dots,15\}$, maka himpunan fuzzy A yang menyatakan bilangan bulat yang berkisar 10 dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$A = \{(x, \mu_A(x) | \mu_A(x) = (1+(x-10)^2)^{-1}\}$$

dengan $\mu_A(x) = (1+(x-10)^2)^{-1}$ adalah fungsi keanggotaan dari x .

2.1.3 Definisi-definisi Dasar Teori Himpunan Fuzzy

Definisi 2.2 Anggota (Support)

Anggota dari sebuah himpunan fuzzy A , $S(A)$ adalah himpunan crisp dari semua $x \in X$ yang memiliki $\mu_A(x) > 0$

Definisi 2.3 α -level set

α - level set dari sebuah himpunan fuzzy A adalah himpunan crisp dari semua $x \in X$ yang memiliki derajat keanggotaan $\geq \alpha$

$$A_\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha \} \quad (2.4)$$

$A_\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha \}$ disebut “strong α – level set” atau “strong α – cut”

Definisi 2.4 Tinggi (Height)

Tinggi adalah derajat keanggotaan terbesar di dalam himpunan fuzzy

Definisi 2.5 Kardinalitas Skalar $|A|$

Untuk sebuah himpunan fuzzy yang berhingga A , kardinalitas skalar $|A|$



2.1.4 Operasi Dasar Himpunan Fuzzy

Seperti pada himpunan crisp, operasi dasar dalam himpunan fuzzy adalah irisan (interseksi), gabungan (union), dan komplemen. Ketiga operasi ini pertama kali diungkapkan oleh Zadeh pada tahun 1965. Selain operasi tersebut terdapat operasi lain yang tidak dijumpai dalam himpunan crisp.

Definisi 2.8 Operasi Interseksi

Fungsi keanggotaan $\mu_c(x)$ dari operasi irisan $C = A \cap B$ didefinisikan oleh

$$\mu_c(A) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad x \in X \quad (2.8)$$

Definisi 2.9 Operasi Union

Fungsi keanggotaan $\mu_D(x)$ dari operasi union $D = A \cup B$ didefinisikan oleh

$$\mu_D(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad x \in X \quad (2.9)$$

Deinisi 2.10 Operasi Komplemen

Fungsi keanggotaan dari operasi komplemen sebuah himpunan fuzzy A , $\mu_{/A}(x)$ didefinisikan oleh

$$\mu_{/A}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad x \in X \quad (2.10)$$

Contoh 2.3

Jika A dan B adalah dua himpunan fuzzy yang didefinisikan oleh :

$$A = \{(1,0.2), (2,0.5), (3,0.8), (4,1), (5,0.7), (6,0.3)\}$$

$$B = \{(3,0.2), (4,0.4), (5,0.6), (6,0.8), (7,1), (8,1)\}$$

Maka :

Interseksi dari $C = A \cap B$ adalah

$$C = \{(3,0.2), (4,0.4), (5,0.6), (6,0.3)\}$$

Union dari $D = A \cup B$ adalah

$$D = \{(1,0.2), (2,0.5), (3,0.8), (4,1), (5,0.7), (6,0.8), (7,1), (8,1)\}$$

Komplemen dari himpunan fuzzy B adalah

$$\complement B = \{(1,1), (2,1), (3,8), (4,0.6), (5,0.4), (6,0.2), (9,1), (10,1)\}$$

2.1.5 Variabel Linguistik Fuzzy

Sebuah variable linguistic dicirikan oleh $(x, T(x), U)$ dengan x adalah variabel, $T(x)$ adalah kumpulan peristilahan dari x , yaitu kumpulan nilai linguistic yang mengklaskan x menjadi beberapa kelas kejadian. Setiap nilai linguistic tersebut dinyatakan dalam himpunan fuzzy dengan keanggotaan tertentu yang didefinisikan pada semester pembicaraan U .

Sebagai contoh didefinisikan kumpulan peristilahan $Y(x)$ yang menyatakan “usia”, maka didefinisikan $T(\text{usia}) = \{\text{tua}, \text{sangat tua}, \text{muda}, \text{sangat muda}\}$ dengan $U = [0, 100]$ dalam satuan tahun. Untuk menyatakan himpunan fuzzy yang menyatakan variabel linguistik “tua” didefinisikan.

$$M(\text{tua}) = \{(u, \mu_{\text{tua}}(u)) \mid u \in [0, 100]\} \quad (2.11)$$

dengan fungsi keanggotaan

$$\mu_{\text{tua}}(u) = \begin{cases} 0 & | u \in [0, 50] \\ (1 + ((u-50)/5)^2)^{-1} & | u \in [50, 100] \end{cases} \quad (2.12)$$

yang merupakan irisan dari G dan C . Set keputusan fuzzy D , $D = G \cap C$, mempunyai fungsi keanggotaan

$$\mu_D = \min(\mu_G, \mu_C) \quad (2.13)$$

Dalam bentuk umum dengan n fuzzy goal G_1, G_2, \dots, G_n dan m fuzzy criteria pembatas C_1, C_2, \dots, C_m maka set fuzzy decision merupakan irisan dari semua goal dan criteria pembatas

$$D = G_i \cap C_j, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (2.14)$$

dengan fungsi keanggotaan

$$\begin{aligned} \mu_D &= \min(\mu_{G1}, \mu_{G2}, \dots, \mu_{Gn}, \mu_{C1}, \mu_{C2}, \dots, \mu_{Cm}) \\ &= \min(\mu_{Gi}, \mu_{Cj}), \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, m \end{matrix} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Contoh suatu set keputusan fuzzy dijelaskan pada gambar 2.1

2.2.2 Pemrograman Dinamis Fuzzy

Pemrograman dinamis fuzzy diperkenalkan pertama kali oleh Bellman dan Zadeh pada tahun 1970. Pengembangan konsep pemrograman dinamis fuzzy dilakukan oleh Bellman dan Zadeh sebagai kerangka pengambilan keputusan dalam ruang himpunan fuzzy.

Pemodelan pemrograman dinamis fuzzy oleh Bellman dan Zadeh menggunakan notasi sebagai berikut :

Variabel state crisp $X_i \in X, i = 0, \dots, n$

Set nilai pada variabel state $X = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$

2. Fuzzy kriteria pembatas C_1 dengan fungsi keanggotaan $\mu_{C_1}(d_1)$

Formulasi menentukan keputusan yang maksimal adalah

$$D^0 = \{d_i^0\} \quad i = 0, \dots, n \text{ untuk } x_i \text{ yang diberikan} \quad (2.16)$$

Sesuai dengan definisi 2.11, set keputusan fuzzy adalah irisan dari goal dan kriteria pembatas, yaitu

$$D = \bigcap_{i=0}^{n-1} [C_i \cap G_n] \quad (2.17)$$

Dengan menggunakan operator interseksi, maka fungsi keanggotaan set keputusan fuzzy adalah

$$\mu_D(d_0, \dots, d_{n-1}) = \min \{ \mu_{C_0}(d_0), \dots, \mu_{C_{n-1}}(d_{n-1}), \mu_{G_n}(x_n) \} \quad (2.18)$$

fungsi keanggotaan keputusan maksimal adalah

$$\mu_D^0(d_{i-1}^0, \dots, d_{n-1}^0) = \max_{d_0, \dots, d_{n-2}, d_{n-1}} [\min \{ \mu_{C_0}(d_0), \dots, \mu_{G_n}(t_n(x_{n-1}, d_{n-1})) \}]$$

dengan d_i^0 adalah notasi keputusan optimal, pada stage i . Jika K adalah bilangan konstan dan g adalah sembarang fungsi dari d_{n-1} , maka dapat dituliskan

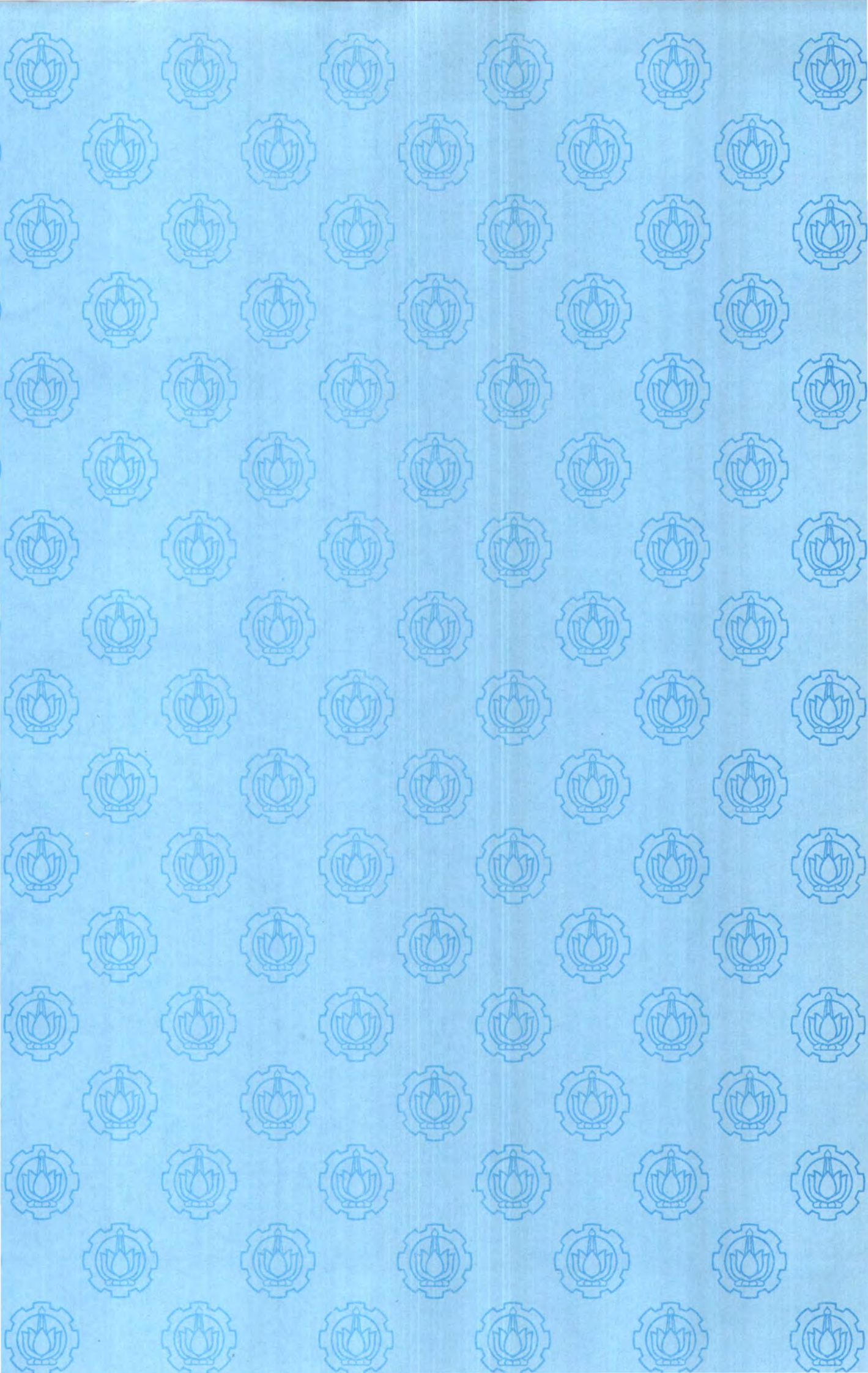
$$\max_{d_{n-1}} \min \{ g(d_{n-1}), K \} = \min \{ K, \max_{d_{n-1}} g(d_{n-1}) \}$$

dan persamaan (2.17) dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\mu_D^0(d_{i-1}^0, \dots, d_{n-1}^0) = \max [\min \{ \mu_{C_0}(d_0), \dots, \mu_{G_{n-1}}(x_{n-1}) \}] \quad (2.20)$$

dengan

$$\mu_{G_{n-1}}(x_{n-1}) = \max [\min \{ \mu_{C_{n-1}}(d_{n-1}), \mu_{G_n}(t_n(x_{n-1}, d_{n-1})) \}] \quad (2.21)$$



BAB III

OPERASI EKONOMIS SISTEM TENAGA ELEKTRIK

3.1 Unit Commitment

Unit Commitment adalah bagian dari pengelolaan sistem tenaga yang menentukan penjadualan pembangkitan daya tiap-tiap unit dengan mempertimbangkan kendala operasi untuk mencatu beban sistem sehingga jumlah biaya operasi minimum. Proses pengambilan keputusan adalah untuk menentukan unit-unit start up dan unit-unit shut down dengan mempertimbangkan besar beban, jenis unit pembangkit berdasarkan jenis bahan bakar, kemampuan daya tiap unit, spinning reserve, kemungkinan penggabungan dua unit dengan bahan bakar yang berbeda, dan kriteria kendala yang lain [7]

Permasalahan unit commitment didefinisikan sebagai permasalahan non linear berskala besar dan merupakan proses optimasi mixed integer [9]. Persoalan yang dihadapi semakin kompleks dengan semakin banyak serta beraneka ragamnya jenis pusat pembangkit yang dimiliki dan beragamnya kendala yang harus dipenuhi. Sehingga dalam beberapa metoda optimasi yang dikembangkan, untuk menangani permasalahan tersebut dilakukan penyederhanaan model. Selanjutnya pada tulisan ini diasumsikan bahwa optimasi unit commitment dilakukan untuk unit thermal yang dioptimasi secara terpisah dari jenis unit lainnya.

3.1.1 Formulasi Unit Commitment

Permasalahan unit commitment diformulasikan sebagai berikut [7]

Minimisasi Biaya Operasi

Kriteria kendala

Minimum up time dan minimum down time

Limit kapasitas pembangkitan

Status Unit

Keseimbangan Daya dan Beban

Spinning Reserve

Fungsi objektif biaya operasi dikelompokkan menjadi dua, yaitu :

1. Biaya Bahan Bakar

Karakteristik biaya bahan bakar unit pembangkit digambarkan sebagai kurva input/output (I/O) yang dimodelkan sebagai fungsi kuadrat. Karakteristik input/output menyatakan hubungan antara suatu masukkan unit pembangkit sebagai fungsi dari keluaran bersih yang dihasilkan oleh unit pembangkit tersebut. Yang lazim digunakan sebagai satuan keluaran suatu unit pembangkit adalah satuan daya listrik (MW), sedangkan sebagai satuan masukkan adalah kalori bahan bakar dalam MBtu atau dinyatakan dengan nilai mata uang dalam \$/jam.

Persamaan bahan bakar untuk unit thermal didefinisikan sebagai berikut [7] :

$$FC(G_i) = F_i * H_i(G_i) \quad (3.1)$$

Keterangan :

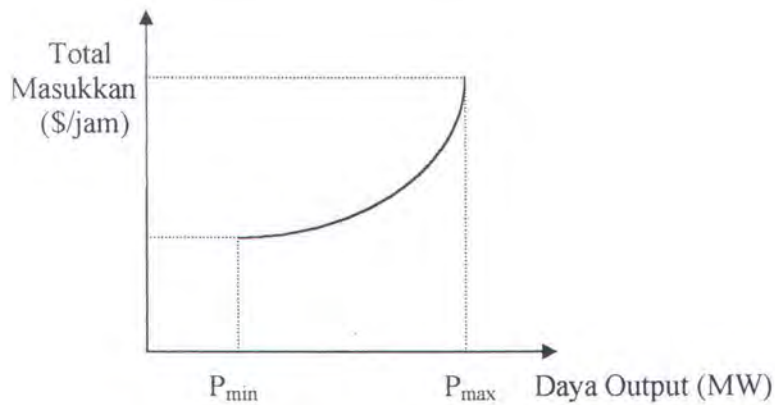
G_i : level daya yang dibangkitkan (MW)

$FC(G_i)$: besar biaya yang dikeluarkan tiap jam untuk input bahan bakar unit pembangkit (\$/jam)

F_i : harga satuan bahan bakar (\$/MBtu)

$H_i(G_i)$: Kurva laju panas (uap) (MBtu/jam)

Karakteristik Input Output unit pembangkit thermal digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Karakteristik Input/Output Unit Thermal

1. Biaya start up

Beberapa unit thermal, dalam hal ini PLTU, tidak dapat bekerja dengan seketika karena memerlukan waktu untuk menaikkan temperatur dan tekanan kerja guna membangkitkan uap kritis untuk menggerakkan turbin. Dibutuhkan sejumlah energi agar unit-unit tersebut bekerja secara on-line. Biaya energi tersebut dikenal dengan istilah biaya start up. Biaya start up bervariasi dari kondisi maksimum cold start sampai biaya minimal apabila suatu unit baru saja dilepas dari interkoneksi dan suhu boiler relatif dekat dengan temperature normal [9].

Biaya start up merupakan fungsi waktu selama tidak bekerja (down time).

Biaya start up tersebut diformulasikan sebagai berikut :

$$SCOST_i = SCS_i (1 - \exp(-D_i \cdot V_i)) + CM_i \quad (3.2)$$

keterangan,

$SCOST_i$: biaya start up unit i (\$)

SCS_i : biaya start up dingin unit I (\$)

$TS_i \cdot F$ (TS_i = energi start up (MBtu)).

- F =harga satuan enrgi (\$/MBtu)
- D_i : waktu dalam kondisi tidak bekerja (jamⁱ)
- V_i : laju pendinginan (jamⁱ) -1/α_i
(α_i = konstanta waktu unit thermal)
- CM_i : biaya konstan untuk pemeliharaan

Fungsi obyektif harus diminimalkan selama rentang optimasi. Apabila dalam suatu sistem tenaga terdapat i unit thermal (i = 1,...,I) dengan rentang waktu studi estimasi beban selama N jam, maka fungsi obyektif diformulasikan sebagai berikut :

$$FCOST = \text{Min} \sum_{H=1}^N [\sum_{i=1}^I PCOST_i(G_i(H) + SCOST_i)], H = 1, \dots, N$$

(3.3)

keterangan :

- FCOST : biaya operasi selama periode pengamatan (\$)
- PCOST(G_i(H)) : biaya yang dibutuhkan untuk membangkitkan daya sebesar G_i oleh unit pembangkit i pada jam H(\$)
- SCOST_i : biaya start up unit pembangkit i (\$)

Kriteria Pembatas

1. Minimum Up Time dan Minimum Down Time

Suatu unit pembangkit thermal harus bekerja selama beberapa jam sebelum bisa dilepas dari interkoneksi. Oleh karena itu maka ditentukan besar minimum up time sebagai pembatas waktu minimal suatu pembangkit beroperasi. Sebaliknya,

minimum down time adalah waktu yang diperlukan suatu unit dalam kondisi tidak bekerja sampai siap digabung dengan jaringan. Kriteria kendala tersebut diformulasikan sebagai berikut[8] :

$$(t_{H-1,i}^{on} - T_i^{on}) * (S_{H-1,i} - S_{H,i}) \geq 0, \text{ minimum up time}$$

$$(t_{H-1,i}^{off} - T_i^{off}) * (S_{H-1,i} - S_{H,i}) \geq 0, \text{ minimum down time}$$

keterangan :

$t_{H,i}^{on}$: waktu unit I pada kondisi bekerja sampai jam H

$t_{H,i}^{off}$: waktu unit I pada kondisi tidak bekerja sampai jam H

T_i^{on} : minimum up time unit i (jam)

T_i^{off} : minimum down time unit i (jam)

$S_{H,i}$: 1, jika unit i bekerja pada jam H

0, jika unit i tidak bekerja

Beberapa unit memiliki minimum up time dan minimum down time singkat (dalam orde menit) sehingga dapat dianggap 0 jam.

2. Limit Kapasitas Pembangkitan

Batas maksimum dan minimum pembangkitan menyebabkan suatu unit harus bekerja pada rentang yang diijinkan

$$G_i^{\min} \leq G_{H,i} \leq G_i^{\max} \quad (3.5)$$

keterangan :

G_i^{\min} : kapasitas pembangkitan minimum unit I (MW)

$G_{H,i}$: daya yang dibangkitkan unit I pada jam H (MW)

G_i^{\max} : kapasitas pembangkitan maksimum unit I (MW)

3. Status Unit

Status masing-masing unit pembangkit adalah merupakan salah satu dari kondisi berikut :

1. Unit dalam kondisi siap untuk dijadwalkan dtart up atau shut down (Available).
2. Unit yang tidak dapat dijadwalkan karena dalam kondisi pemeliharaan (Outaged).
3. Unit yang harus bekerja terus menerus (Must Run)
4. Unit yang bekerja dengan konstan daya output (Fixed).
5. Unit yang dapat bekerja dengan cepat tanpa ada batasan minimum up time dan minimum down time.

4. Kesetimbangan Daya Pembangkitan dan Beban

Daya yang dibangkitkan seluruh unit on-line harus ekivalen dengan beban sistem :

$$\sum_{i=1}^I G_i(H) = L(H), \quad H = 1, \dots, N \quad (3.6)$$

keterangan

$G_i(H)$ = daya yang dibangkitkan unit I pada jam H (MW)

$L(H)$ = beban estimasi pada jam H (MW)

5. `Spinning Reserve

Spinning reserve merupakan besarnya daya pembangkitan yang dapat dibangkitkan (available) oleh seluruh unit on line dalam sistem dikurangi dengan beban sistem pada saat tersebut [9]. Asumsi yang diambil pada definisi tersebut adalah

dengan mengabaikan susut daya saluran transmisi. Spinning Reserve suatu sistem ditentukan berdasarkan beban puncak guna menghindari penurunan frekuensi sistem akibat terlepasnya satu atau beberapa unit dari sistem. Kriteria kendala spinning reserve diformulasikan sebagai berikut :

$$\sum_{i=1}^N G_i^{\max} \cdot I_{H,i} \geq L(H) + REQ(H), \quad H = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

keterangan :

G_i^{\max} : kapasitas pembangkitan maksimum unit I (MW)

$I_{H,i}$: 1, jika unit I bekerja pada jam H

0, jika unit I tidak bekerja

$L(H)$: beban estimasi pada jam H (MW)

$REQ(H)$: kebutuhan cadangan daya pada jam H (MW)

Beberapa kriteria kendala yang lain tidak dibahas pada tulisan ini guna penyederhanaan algoritma pemrograman, namun dapat dipertimbangkan tanpa mengakibatkan perubahan struktur program. Beberapa kriteria kendala yang diabaikan pada pembahasan ini adalah crew constraint, ramp rate limit, duration of units, area reserve, dan kontribusi maksimum tiap unit pada kriteria kendala spinning reserve.

3.1.2 Algoritma Pemrograman dinamis

Pada aplikasi unit commitment, pemrograman dinamis melakukan seleksi seluruh keputusan selama rentang waktu optimasi. Satu keputusan merupakan satu kombinasi dari status seluruh unit dalam sistem. Keputusan-keputusan tersebut dikenal dengan istilah state-state dari pemrograman dinamis. State yang feasible

adalah state yang memenuhi seluruh criteria pembatas. Seleksi state feasible untuk menentukan biaya minimal dilakukan secara berulang dan pada setiap langkah ditentukan satu keputusan untuk meminimalkan biaya total selama rentang optimasi tercapai. Satu langkah dalam rentang optimasi tersebut dikenal sebagai stage, dan tiap stage menyatakan satu jam operasi.

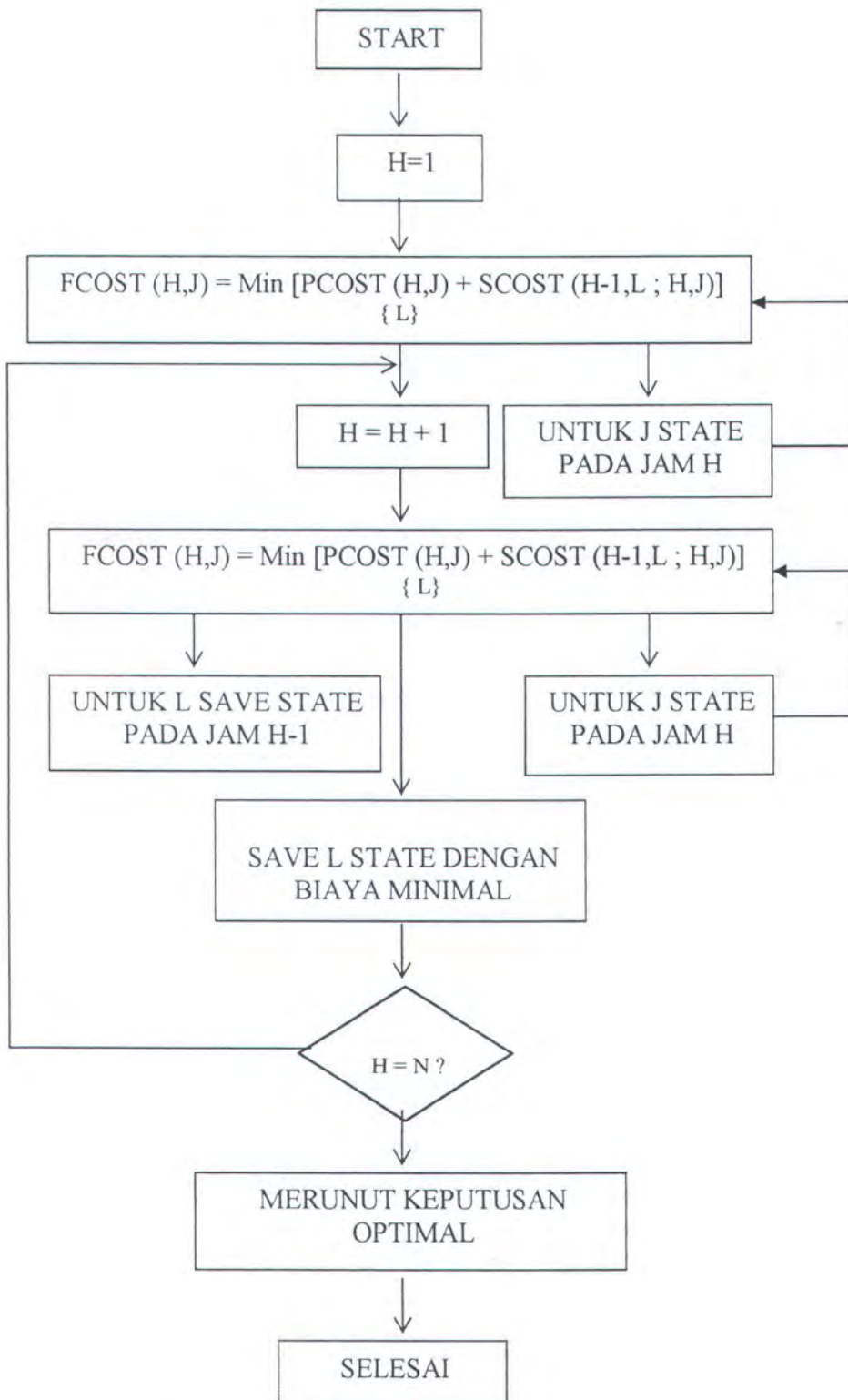
Proses seleksi state-state feasible dapat dilakukan dengan langkah ke depan (Forward dynamic programming) menentukan biaya operasi minimal dimulai dari stage pertama kemudian melakukan pentahapan ke belakang (back Tracking) dari stage dengan biaya total minimal pada stage terakhir sampai pada awal stage. Back Tracking dilakukan guna menentukan penjadwalan optimal pada tiap jam operasi. Penggunaan metode forward dynamic programming memudahkan dalam penentuan inisialisasi pada jam-jam selanjutnya berdasarkan hasil yang direkam pada jam sebelumnya [9]. Disamping itu juga proses optimasi dapat dilakukan seiring dengan waktu selama kemampuan komputasi mengijinkan. Flow Chart forward dynamic programming untuk optimasi unit commitment dengan rentang waktu optimasi selama N periode dijelaskan pada gambar 3.2

Dari blok diagram gambar 3.2. algoritma iterasi untuk menentukan biaya operasi minimal pada optimasi unit commitment adalah

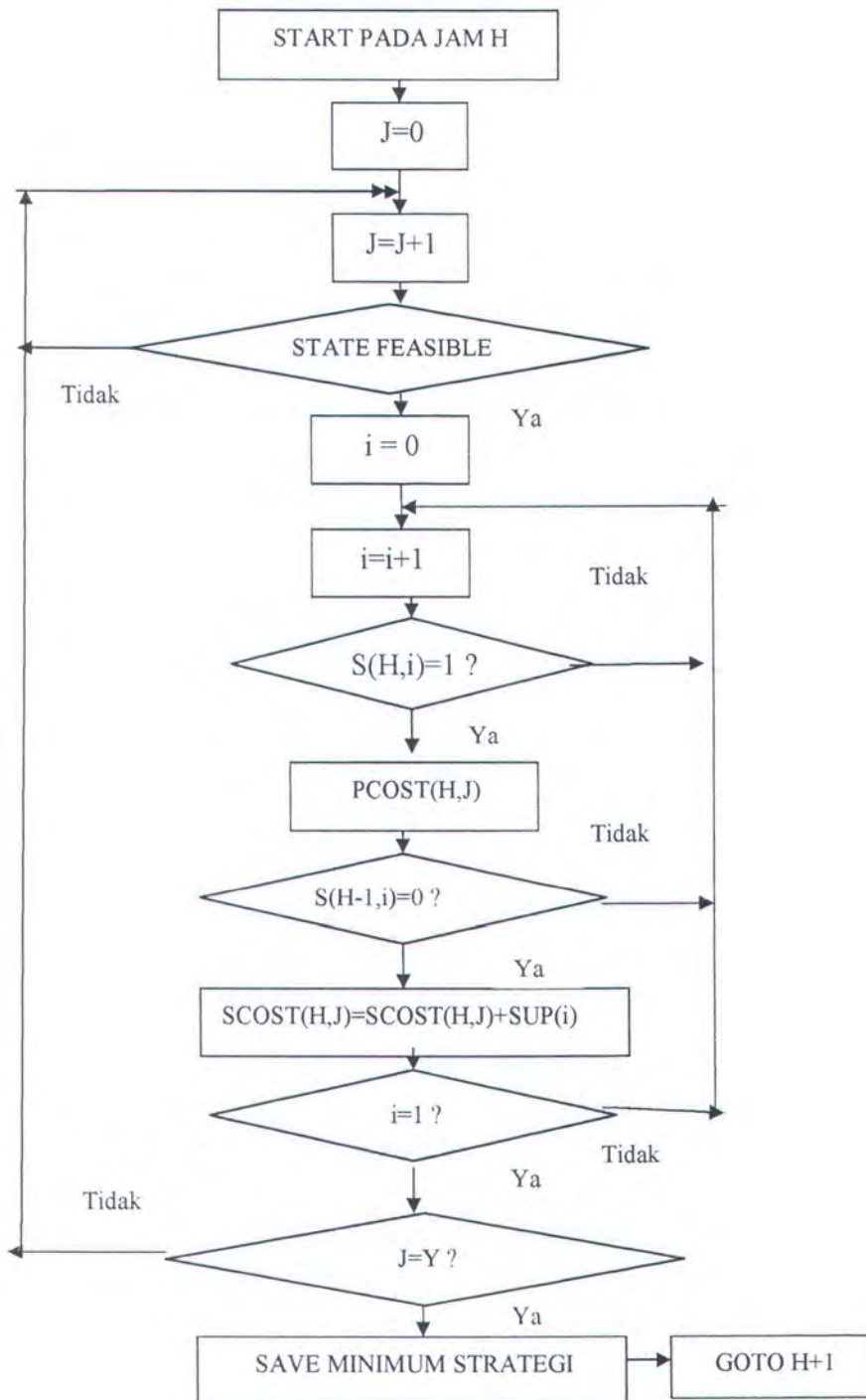
$$FCOST(H,J)=\underset{\{L\}}{\text{Min}}[PCOST(H,J)+SCOST(H-1,L,H,J)+FCOST(H-1,L)] \quad (3.8)$$

keterangan :

- FCOST(H,J) : biaya minimal sampai state (H,J)
- PCOST(H,J) : biaya pembangkitan daya pada state (H,J)
- SCOST(H-1,L,H,J) : biaya start up state (H-1,L) ke state (H,J)
- (L) : set state feasible yang disimpan pada stage H-1



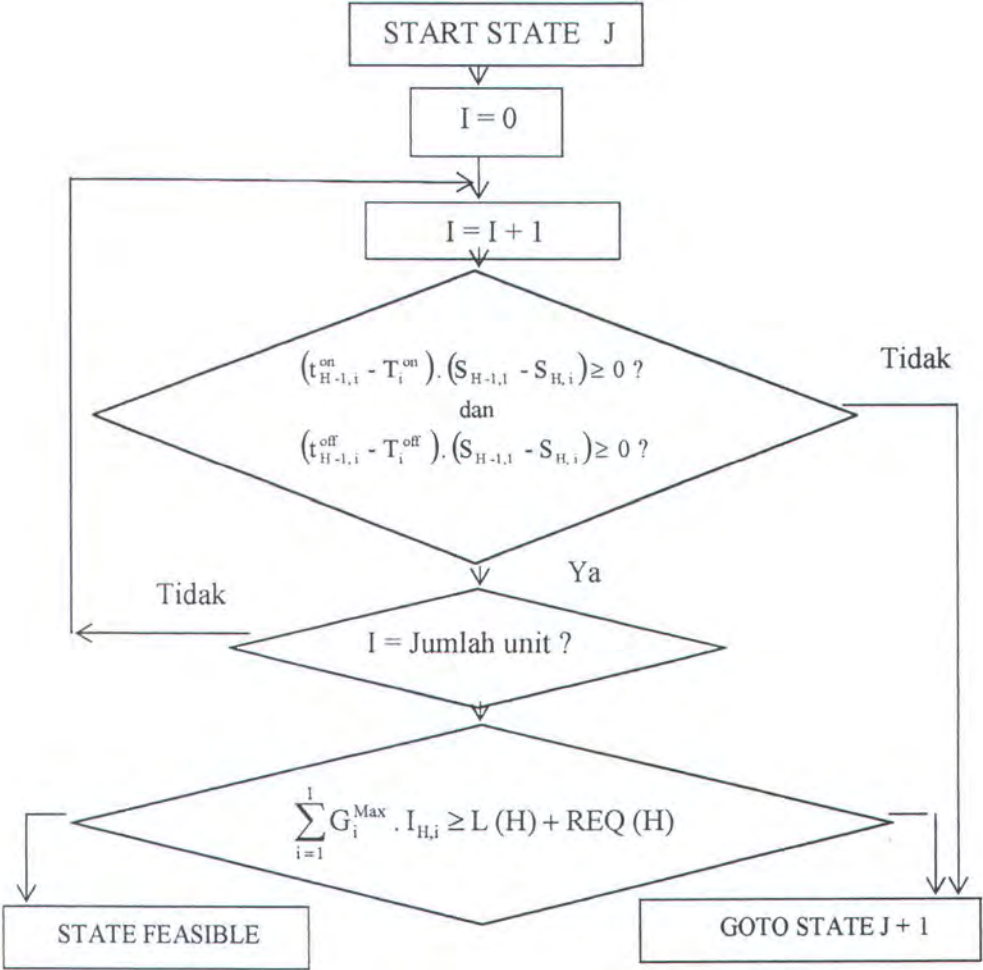
Gambar 3.2 Algoritma Pemrograman Dinamis Untuk Unit Commitment



Gambar 3.3 Algoritma perhitungan biaya pembangkitan dan biaya start up

Variabel $PCOST(H,J)$ ditentukan melalui economic dispatch unit-unit on line yang bersesuaian dengan kombinasi unit pada state (H,J) . Variable

SCOST(H-1,L,H,J) merupakan biaya start up (biaya transisi) yang dihitung berdasarkan perubahan status unit dari kondisi tidak bekerja pada state (H-1,L) ke kondisi bekerja pada stage (H,J). Variabel FCOST(H-1,L) merupakan biaya minimal pada stage H-1 yang disimpan sebagai window untuk diperhitungkan pada stage selanjutnya guna membentuk jalur optimal. Sebanyak L state yang disimpan pada setiap stage sebagai window.



Gambar 3.4 Algoritma Pemilihan State-state Feasible

Untuk menghitung biaya pembangkitan dan biaya start up pada setiap stage (jam) digunakan algoritma pemrograman seperti pada gambar 3.3. SUP(i) adalah biaya start up untuk unit i. Untuk menghitung biaya start up unit i terlebih dahulu

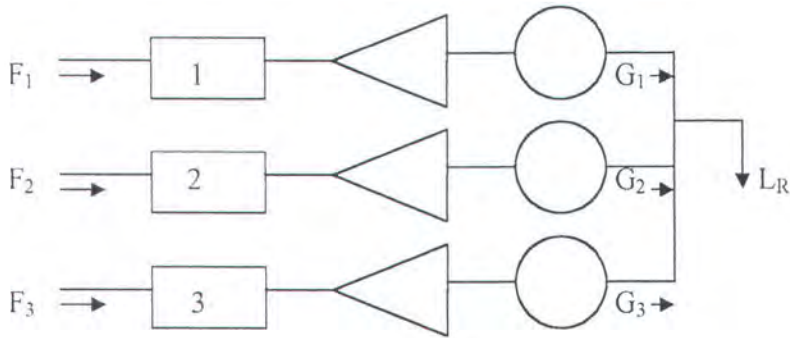


dilihat status unit i pada stage (H-1) dan pada stage H. Apabila terjadi perubahan status unit dari 0 (tidak bekerja) ke 1 (bekerja) maka dihitung biaya start up unit i dengan formula (3.2).

Jumlah state dalam setiap jam adalah sebanyak $J = 2^i$, apabila terdapat i unit dalam sistem yang akan dijadwalkan. Jumlah state tersebut tidak seluruhnya feasible, sehingga untuk menghemat waktu komputasi hanya state yang feasible yang dihitung besar biaya pembangkitan dan biaya start up. State feasible adalah state yang memenuhi seluruh kriteria pembatas. Untuk menentukan state yang feasible digunakan algoritma sesuai gambar 3.4

3.2 Economic Dispatch

Untuk pelayanan beban listrik dengan mengabaikan rugi-rugi saluran transmisi, konfigurasi system tenaga disederhanakan seperti pada Gambar 3.5. Sistem terdiri dari 1 buah unit pembangkit thermal yang dihubungkan dengan satu bus yang melayani beban listrik sebesar L_R . Input tiap unit digambarkan sebagai biaya pembangkit F_i dalam satuan \$/jam. Output masing-masing unit pembangkit adalah G_i . total biaya pembangkitan untuk sistem tersebut adalah penjumlahan dari total biaya pembangkitan masing-masing unit. Kriteria pembatas dalam operasi sistem tersebut adalah kesetimbangan energi dan beban dalam arti jumlah output tiap pembangkit harus sama dengan beban dan kriteria pembatas limit kapasitas pembangkitan daya.



Gambar 3.5 Pelayanan beban L_R oleh l unit thermal

Fungsi objektif F_1 , adalah sama dengan total biaya untuk melayani beban tertentu. Dengan mengabaikan susut daya saluran transmisi dan secara eksplisit belum ditentukan limit kapasitas pembangkitan tiap unit maka economic dispatch dapat diformulasikan.

$$\begin{aligned}
 F_T &= F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_l \\
 &= \sum_{i=1}^l F_i(G_i) \\
 \emptyset &= 0 = L_R - \sum_{i=1}^l G_i
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Untuk memecahkan permasalahan tersebut digunakan metode kalkulus lanjut dengan fungsi LaGrange. Fungsi LaGrange diformulasikan sebagai berikut

$$\mathcal{L} = F_1 + \lambda \emptyset \tag{3.10}$$

Nilai ekstrim fungsi LaGrange ditentukan melalui turunan pertamanya terhadap variabel bebas dengan nilai turunan pertama sama dengan nol. Persamaan yang dipecahkan memiliki $l+1$ variabel dengan 1 buah keluaran daya tiap pembangkit

G_i , dan faktor pengali LaGrange λ yang tidak diketahui nilainya. Turunan pertama fungsi LaGrange terhadap keluaran daya pembangkit adalah

$$\delta \mathcal{L} / \delta G_i = dF_i (G_i) / dG_i - \lambda = 0 \tag{3.11}$$

atau

$$0 = dF_i / dG_i - \lambda \tag{3.12}$$

Terlihat bahwa kondisi biaya operasi minimum untuk unit thermal tercapai apabila laju biaya tambahan (incremental cost rate) untuk seluruh unit sama dengan pengali LaGrange, λ . Secara lengkap optimasi economic dispatch dengan pengabaian susut daya saluran transmisi dirumuskan sebagai berikut [9]

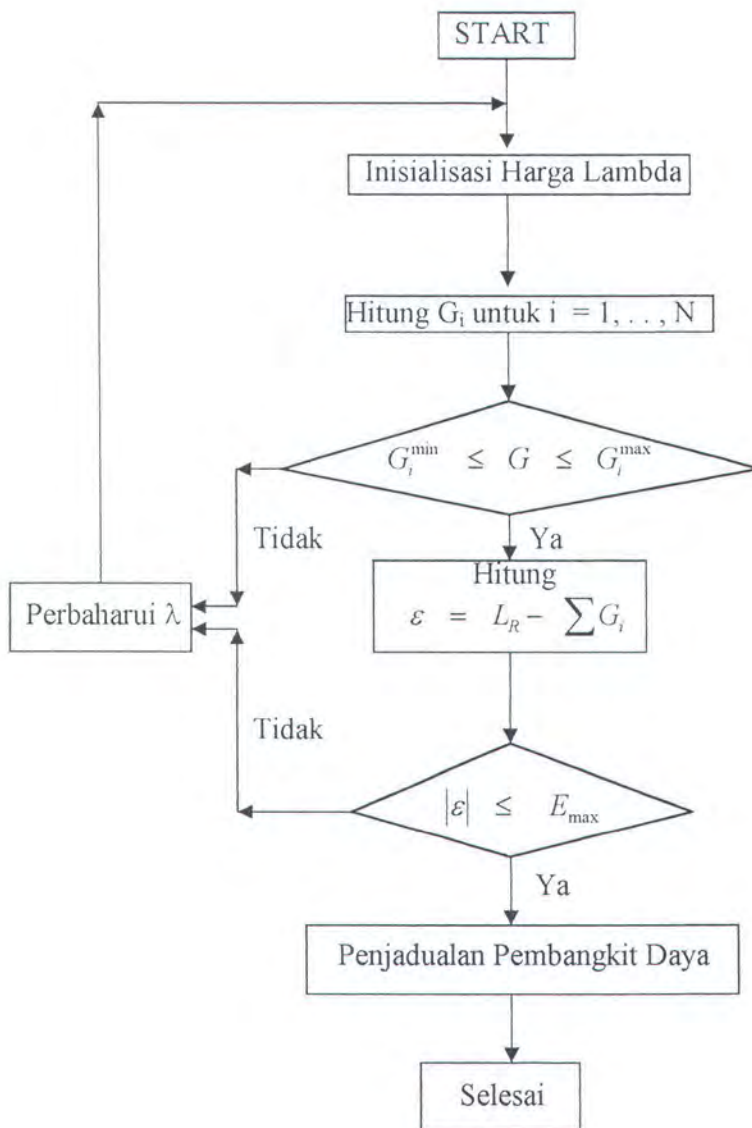
$$dF_i / dG_i = \lambda \qquad \text{1 persamaan}$$

$$G_1^{\min} \leq G_1 \leq G_1^{\max} \qquad \text{2l pertidaksamaan}$$

$$\sum_{i=0}^I G_i = L_R \qquad \text{1 kriteria kendala}$$

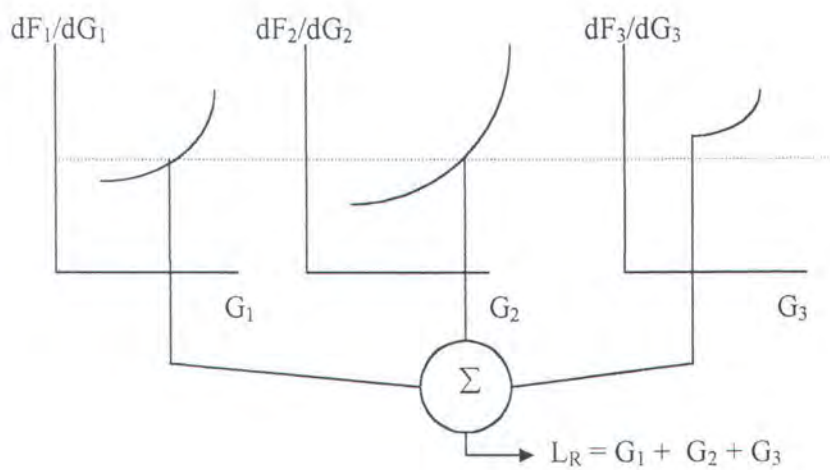
Algoritma pemrograman metode iterasi LaGrange dijelaskan pada gambar 3.6. Blok diagram metode iterasi LaGrange tersebut merupakan solusi umum economic dispatch untuk unit thermal dengan mengabaikan rugi-rugi transmisi. Pendekatan untuk mencari solusi permasalahan ini menggunakan kurva karakteristik biaya tambahan guna menentukan nilai λ yang selanjutnya diformulasikan dengan algoritma pemrograman.

Apabila terdapat tiga unit pembangkit dengan status bekerja maka dapat digambarkan kurva karakteristik biaya tambahan tiap unit dengan plot yang sama seperti pada gambar 3.7. Untuk menentukan titik operasi ketiga unit tersebut sehingga biaya operasi minimum dan kriteria kendala beban terpenuhi, ditentukan



Gambar 3.6. Economic Dispatch dengan metode iterasi lambda

harga λ inisialisasi berdasarkan ketiga plot grafik tersebut. Dari harga λ tersebut ditentukan daya output masing-masing unit. Dari hasil perhitungan, asumsi harga λ yang diberikan belum tentu tepat. Hal ini disebabkan karena setiap unit memiliki limit pembangkitan dan kurva karakteristik biaya tambahan yang berbeda.

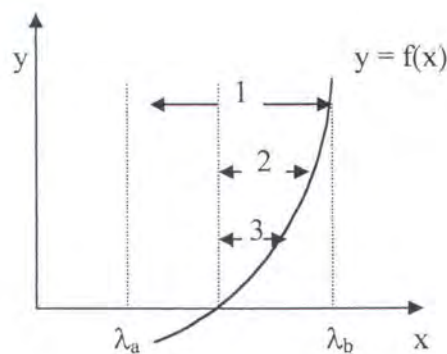


Gambar 3.7. Economic Dispatch dengan solusi grafik

Pada pembahasan ini ditentukan nilai λ inisialisasi sedemikian sehingga output daya setiap unit pada harga λ tersebut berada pada limit pembangkitan, dalam arti berada pada rentang pembangkitan minimum dan pembangkitan maksimum. Sehingga untuk menentukan output daya yang ekuivalen dengan beban perubahan nilai λ akan memberikan perubahan keluaran yang tiap unit dalam rentang yang masih feasible. Hal ini memberikan kemudahan dengan tanpa memperhatikan kurva karakteristik biaya tambahan masing-masing unit. Algoritma iterasi akan menentukan λ inisialisasi untuk memulai iterasi perbaikan nilai λ pada rentang pembangkitan yang masih feasible. Pada blok diagram gambar 3.6 terlihat bahwa sebelum pembangkitan daya setiap unit berada pada limit pembangkitannya belum dilakukan perhitungan deviasi beban. Setelah limit pembangkitan tiap unit terpenuhi baru baru dilakukan perbaikan nilai λ untuk menentukan output daya yang ekuivalen

dengan beban. Untuk perbaikan nilai λ digunakan metode numerik Bisection. Iterasi Bisection akan menentukan harga λ optimal sedemikian sehingga kriteria kendala kesetimbangan beban dan pembangkitan terpenuhi.

Metode Bisection adalah metode numerik untuk menentukan akar persamaan non linear pada suatu interval tertentu yang telah diketahui keberadaan akar yang akan dicari. Pencarian akar secara satu persatu dalam arti pada satu interval hanya terdapat satu akar persamaan yang kita cari. Karena λ merupakan turunan pertama dari persamaan kuadrat maka karakteristik input/output pada satu interval hanya terdapat satu nilai λ yang optimal.



Gambar 3.8 Metode Bisection

Algoritma metode Bisection adalah sebagai berikut :

1. Tentukan interval $[\lambda_a, \lambda_b]$
2. Tentukan midpoint : $\lambda_c = \frac{1}{2} (\lambda_a + \lambda_b)$
3. Jika $\lambda_b - \lambda_c \leq \epsilon$, maka λ_c = akar dan selesai
4. jika $f(\lambda_b) f(\lambda_c) < 0$ maka $\lambda_a = \lambda_c$ else $\lambda_b = \lambda_c$
5. Go to 2

Untuk menentukan interval $[\lambda_a, \lambda_b]$ dilakukan dengan mengubah kenaikan atau penurunan nilai λ sebesar 10%

Algoritma penentuan interval $[\lambda_a, \lambda_b]$

1. Tentukan λ inisialisasi
2. Hitung ΣG_i
3. If $\Sigma G_i < L_R$ then $\lambda_i = 1,1 * \lambda_{i-1}$ else $\lambda_i = 0,9 * \lambda_{i-1}$
4. If λ_i memberikan $\Sigma G_i - L_R$ dan λ_{i-1} memberikan $\Sigma G_i - L_R$ then $\lambda_a = \lambda_{i-1}$ dan $\lambda_b = \lambda$ else Go to 3
5. Go to 7
6. If λ_i memberikan $\Sigma G_i < L_R$ dan λ_{i-1} memberikan $\Sigma G_i > L_R$ then $\lambda_a = \lambda_i$ dan $\lambda_b = \lambda_{i-1}$ else Go to 3
7. Selesai

Kecepatan konvergensi metode Bisection ini bergantung dari besarnya deviasi (error) yang diinginkan dan pengaturan nilai λ untuk menentukan interval $[\lambda_a, \lambda_b]$.

BAB IV

LOGIKA FUZZY UNTUK MENGAKOMODASI KETIDAKPASTIAN BEBAN SISTEM TENAGA LISTRIK

4.1 Ketidakpastian Beban Sistem Tenaga Listrik

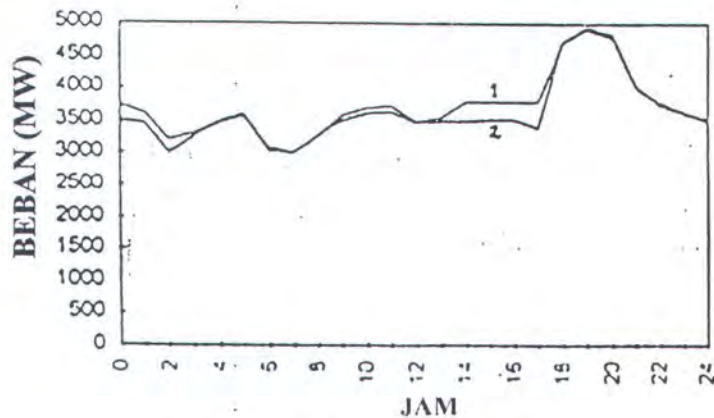
Beban sistem tenaga adalah jumlah seluruh kebutuhan daya listrik pada seluruh bus/node yang ada pada sistem. Pada prinsipnya dapat ditentukan besarnya beban sistem apabila konsumsi tiap pelanggan dapat dengan pasti diketahui. Tetapi golongan pelanggan tenaga listrik beragam dan sulit untuk diperkirakan karena tingkat penggunaan daya listrik dalam berbagai kebutuhan bervariasi. Sehingga tidak mungkin untuk memperkirakan besar beban sistem melalui metode ekstrapolasi data.

Pola perubahan beban sistem dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut dikelompokkan menjadi 4 faktor dominan, yaitu faktor ekonomi, faktor waktu, faktor cuaca, dan faktor kendala yang tidak menentu [4]. Berdasarkan faktor-faktor tersebut selanjutnya dilakukan studi estimasi beban dengan menggunakan teori peluang dan statistika ataupun dengan metode-metode lain. Dari studi estimasi beban diperoleh data kurva estimasi beban. Data kurva estimasi beban sangat diperlukan bagi pengoperasian pusat-pusat pembangkit dari waktu ke waktu, antara lain meliputi penentuan pembangkit mana yang harus terhubung terhadap atau dilepaskan dari sistem, berapa keluaran masing-masing pembangkit sedemikian sehingga biaya total operasi serendah mungkin, serta memperkirakan kemampuan sistem menghadapi kemungkinan keadaan darurat.

Dengan adanya faktor-faktor yang tidak menentu, data kurva estimasi beban akan mengalami penyimpangan terhadap besar beban aktual sistem. Penyimpangan

(deviasi) ini dapat diketahui setelah jangka waktu studi estimasi beban telah terlampaui. Dengan demikian pendistribusian daya dan penjadualan unit pembangkit pada saat tersebut akan mengalami pergeseran.

Sebagai contoh, dapat diperhatikan kurva estimasi beban jangka pendek selama 24 jam pada gambar 4.1.



Keterangan : 1. Rencana 2. Realisasi

Gambar 4.1. Kurva Estimasi beban jangka pendek

Deviasi tiap jam berbeda-beda dan perbedaan tersebut semakin tidak menentu untuk waktu-waktu (hari-hari) yang lain walaupun dalam jam yang sama. Dengan demikian terdapat ketidakpastian pada nilai deviasi beban sistem. Kekaburan ini akan menyebabkan kekaburan pada besarnya cadangan spinning reserve sistem dan pergeseran biaya operasi pada saat dilakukan optimasi operasi ekonomis sistem tenaga. Variabel biaya produksi, cadangan spinning reserve dan beban sistem yang kabur (fuzzy) tersebut dinyatakan dalam variabel fuzzy.

Agar ketidakpastian pada uraian diatas dapat dipecahkan pada operasi ekonomis sistem tenaga terutama dengan metode pemrograman dinamis, maka dilakukan perbaikan pada metode pemrograman dinamis crisp seperti yang telah

dituangkan pada bab III dengan pendekatan logika fuzzy. Selanjutnya formulasi unit commitment ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimisasi} & \text{Biaya Operasi(fuzzy)} \\
 \text{Kriteria kendala} & \\
 & \text{Minimum up time minimum down time (crisp)} \\
 & \text{Limit kapasitas pembangkitan (crisp)} \\
 & \text{Status unit (crisp)} \\
 & \text{Keseimbangan daya dan beban (fuzzy)} \\
 & \text{Spinning reserve (fuzzy)}
 \end{array} \tag{4.1}$$

Dari persamaan (4.1) terlihat masih terdapat persamaan dengan formulasi crisp. Selanjutnya untuk menentukan keputusan optimal dengan memperhitungkan fungsi obyektif dan dua kriteria kendala yang fuzzy, pada setiap state pemrograman dinamis, digunakan definisi 2.11 (Bellman dan Zadeh).

Untuk menentukan keputusan optimal pada setiap state ditentukan set keputusan fuzzy D yang menyatakan irisan antara fungsi obyektif C dengan kriteria pembatas L dan S [5]. Apabila dinyatakan dalam operasi interseksi :

$$D = C \cap L \cap S \tag{4.2}$$

Dari pernyataan persamaan (4.2), operasi interseksi dalam lingkup himpunan fuzzy dilakukan dengan cara menentukan terlebih dahulu variabel C, L, dan S dalam fungsi keanggotaan fuzzy. Dan persamaan (4.2) selanjutnya dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\begin{array}{ll}
 \text{JIKA}(\text{biaya operasi sangat rendah}) \text{ and } (\text{beban aktual tercapai}) \\
 \text{DAN (jumlah spinning reserve sangat besar)} \\
 \text{MAKA}(\text{keputusan optimal operasi ekonomis tercapai})
 \end{array} \tag{4.3}$$

4.2 Fuzzyfikasi

4.2.1 Fungsi Keanggotaan Untuk Fungsi Obyektif Biaya Operasi (C)

Untuk mendapatkan penjadualan pembangkitan dengan biaya total minimum, didefinisikan fungsi keanggotaan untuk biaya operasi sedemikian sehingga penjadualan dengan biaya tinggi diberikan oleh nilai keanggotaan yang kecil.

Fungsi keanggotaan yang dipilih untuk fungsi obyektif biaya operasi adalah[5] :

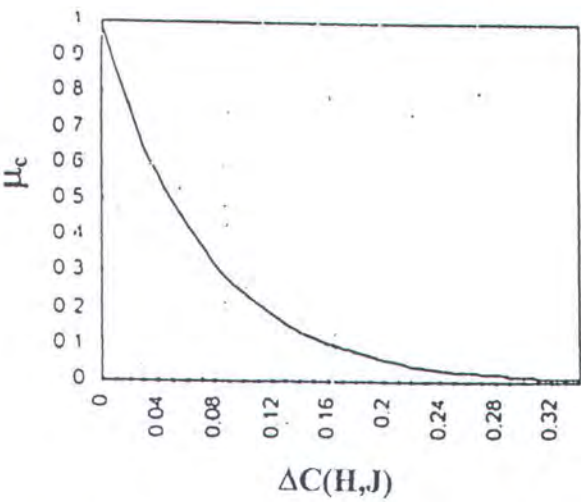
$$\mu_c(H,J) = e^{-\alpha \Delta C} \tag{4.4}$$

dimana,

$$\Delta C(H,J) = \frac{FCOST(H,J)-FCOST_{MIN}(H)}{FCOST_{MIN}(H)} \tag{4.5}$$

keterangan

- FCOST(H,J) = biaya operasi pada state (H,J)
- FCOST_{Min}(H) = biaya operasi terkecil dari seluruh state pada stage H
- α = konstanta pembobot fungsi obyektif



Gambar 4.2 Fungsi Keanggotaan Fungsi Obyektif (C)

Untuk membentuk fungsi keanggotaan C dihitung terlebih dahulu biaya operasi masing-masing state dalam setiap stage dengan menggunakan persamaan (3.6). Selanjutnya biaya operasi setiap state tersebut dinyatakan dalam fungsi keanggotaan C dengan terlebih dahulu mencari biaya minimal dari seluruh state tersebut. Dengan demikian state dengan biaya operasi minimal memiliki nilai keanggotaan 1, sementara state yang lain memiliki nilai keanggotaan antara 0 sampai dengan 1.

4.2.2 Fungsi Keanggotaan Untuk Deviasi Beban Sistem (ΔL)

Telah dijelaskan di muka bahwa hasil estimasi beban selalu terdapat deviasi terhadap beban aktual. Beban sebenarnya, L_{ac} , adalah jumlah dari beban hasil estimasi, L_{for} , dan deviasi estimasi beban, ΔL , L_{for} adalah crisp, sedangkan L_{ac} dan ΔL adalah tidak pasti sehingga dinyatakan dalam variabel fuzzy.

$$L_{ac} = L_{for} + \Delta L \quad (4.6)$$

Untuk menyatakan fungsi keanggotaan L ditentukan lebih dahulu fungsi keanggotaan ΔL . Fungsi keanggotaan ΔL diperoleh melalui analisa hasil estimasi beban harian tahun-tahun terakhir dengan membandingkan beban aktual yang bersesuaian dengan waktu saat dilakukan estimasi beban tersebut.

Kemudian fungsi keanggotaan ΔL yang dipilih sebagai berikut :

$$\mu_L(H) = \frac{1}{1 + \delta \left(\frac{\Delta L}{M} \right)^2} \quad (4.7)$$

keterangan :

$$\Delta L = \text{persentase deviasi} = (L_{ac} - L_{for}) * 100\% / L_{for}$$

- M = nilai rata-rata deviasi absolut
- δ = konstanta

Berdasarkan analisa kurva estimasi beban harian tahun-tahun terakhir diperoleh nilai deviasi absolut. Berdasarkan distribusi nilai deviasi absolut dalam satu hari dapat ditentukan variabel linguistik deviasi beban dalam setiap jam dengan setiap variabel linguistik memiliki nilai rata-rata deviasi absolut tertentu [4,6]. Variabel linguistik yang digunakan adalah *very large* (VL), *Large*(L), *medium*(M), *small*(S) dan *vry small*(VS). Sebagai contoh ditentukan variabel linguistik deviasi beban dalam waktu 24 jam seperti pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Deskripsi Linguistik Deviasi Beban Sistem

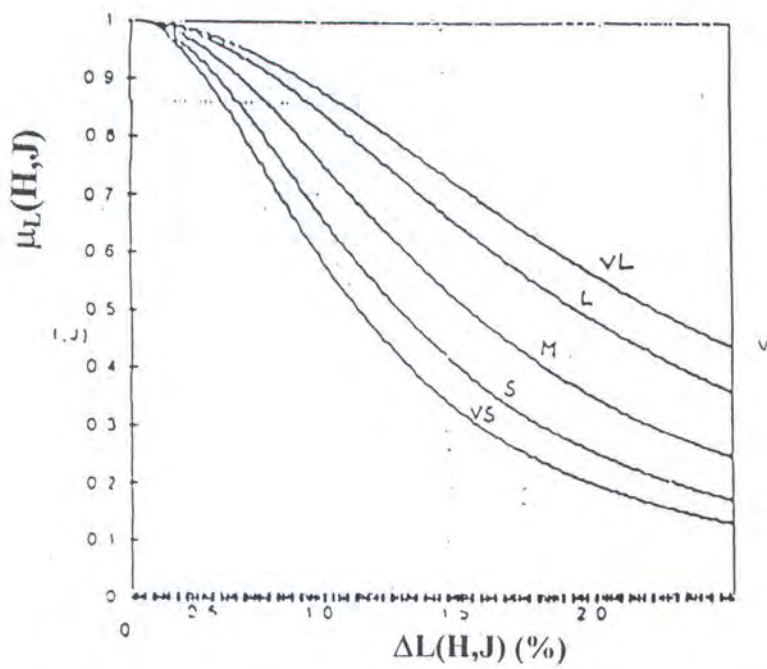
JAM	DEVIASI	JAM	DEVIASI	JAM	DEVIASI
1	VL	9	S	17	S
2	L	10	S	18	S
3	L	11	S	19	S
4	L	12	VS	20	S
5	L	13	M	21	S
6	M	14	S	22	S
7	M	15	S	23	S
8	M	16	S	24	M

Setiap variabel linguistik deviasi beban tersebut memiliki nilai rata-rata deviasi sebagaimana terdapat pada table 4.2.

Tabel 4.2 Nilai deviasi rata-rata absolut

DESKRIPSI LINGUISTIK	M
VL	0.03271
L	0.02786
M	0.02115
S	0.01678
VS	0.01425

Untuk lebih jelasnya bentuk fungsi keanggotaan untuk setiap deskripsi linguistik deviasi beban dapat dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Fungsi Keanggotaan Variabel Linguistik Deviasi Beban

4.2.3 Fungsi Keanggotaan Untuk Spinning Reserve (S)

Pada sistem tenaga telah ditentukan besarnya cadangan daya guna menjamin keamanan apabila terjadi gangguan pada satu atau beberapa unit pembangkit yang terlepas dari sistem. Fungsi keanggotaan untuk cadangan daya didefinisikan sebagai berikut [5] :

$$\mu_s(H) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & , \text{ jika } RES(H) > REQ(H) \\ \exp(\beta \cdot \frac{RES(H) - REQ(H)}{REQ(H)}) & , \text{ jika } RES(H) < REQ(H) \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

keterangan :

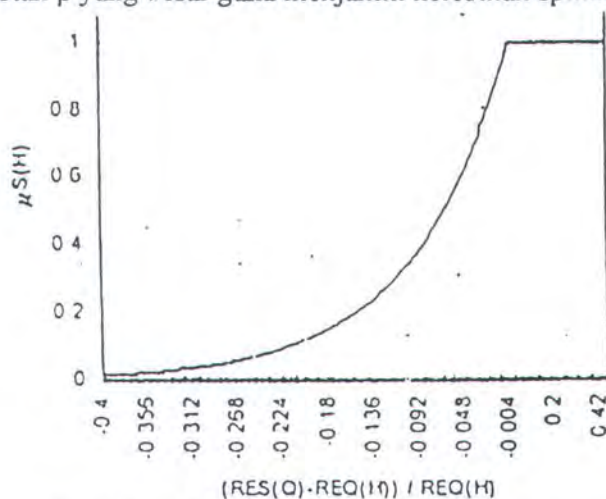
$RES(H)$: spinning reserve dari unit-unit on line pada jam H

$REQ(H)$: spinning reserve yang diijinkan pada jam H

β : faktor pembobotan

Fungsi keanggotaan spinning reserve dapat dilihat pada gambar 4.4.

Pemilihan faktor pembobot pada fungsi keanggotaan ini bergantung kepada operator pusat pengatur beban. Apabila operator memperbolehkan terjadinya defisit spinning reserve dalam jumlah kecil maka dapat dipilih faktor pembobot yang kecil. Apabila diinginkan besarnya $RES(H)$ lebih besar dari $REQ(H)$ maka operator harus memilih faktor pembobotan β yang besar guna menjamin kelebihan spinning reserve.



Gambar 4.4 Fungsi Keanggotaan Spinning Reserve

4.3. Penurunan Algoritma Pemrograman Dinamis fuzzy

Dengan tiga fungsi keanggotaan μ_c , μ_L , dan μ_S dapat ditentukan nilai keanggotaan keputusan D yang merupakan irisan himpunan fuzzy C , L , dan S . Keputusan yang optimal dalam pemrograman dinamis fuzzy adalah satu nilai keanggotaan dari keputusan D yang maksimum. Jadi tujuan yang ingin kita capai adalah menentukan keputusan optimal dengan nilai μ_D yang paling besar. Algoritma

iterasi pemrograman dinamis fuzzy secara umum sama dengan persamaan(3.6) hanya pemakaian notasi dan operasi yang digunakan disesuaikan dengan ruang himpunan fuzzy. Untuk menentukan satu keputusan dengan nilai keanggotaan terbesar pada jam H dengan state J adalah (5).

$$\mu_D(H,J) = \text{Max}_{\{L\}}[\text{Min}(\mu_c(H,J), \mu_l(H,J), \mu_s(H,J), \mu_d(H-1,l))]$$
 (4.9)

keterangan :

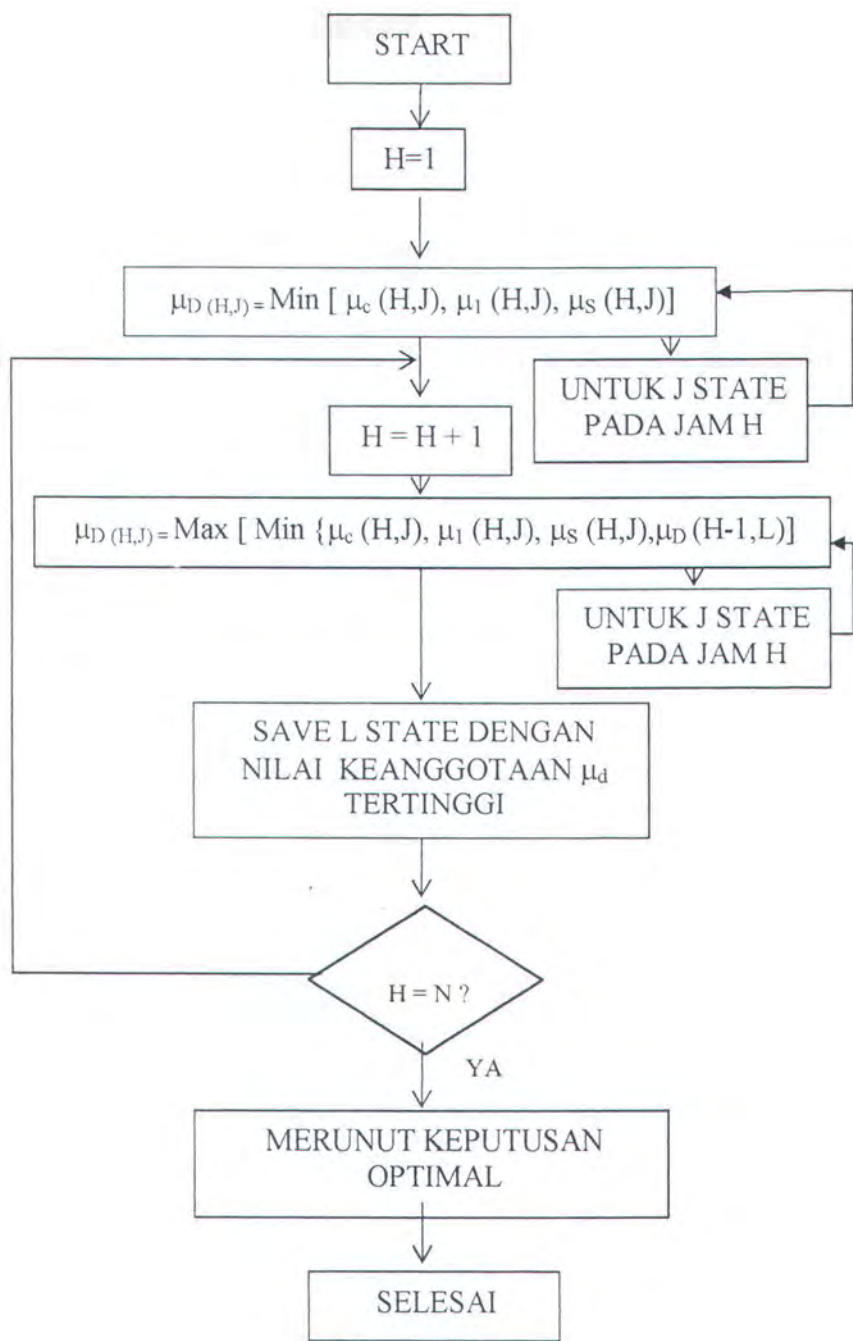
- $\mu_D(H,J)$: nilai keanggotaan keputusan terbesar pada state (H,J)
- $\mu_c(H,J)$: nilai keanggotaan biaya operasi pada state (H,J)
- $\mu_l(H,J)$: nilai keanggotaan beban pada state (H,J)
- $\mu_s(H,J)$: nilai keanggotaan spinning reserve pada state (H,J)
- $\{L\}$: set state feasible pada stage $H-1$ dengan nilai keanggotaan μ_D tertinggi.

Algoritma pemrograman secara lengkap terdapat pada blok diagram gambar 4.5.

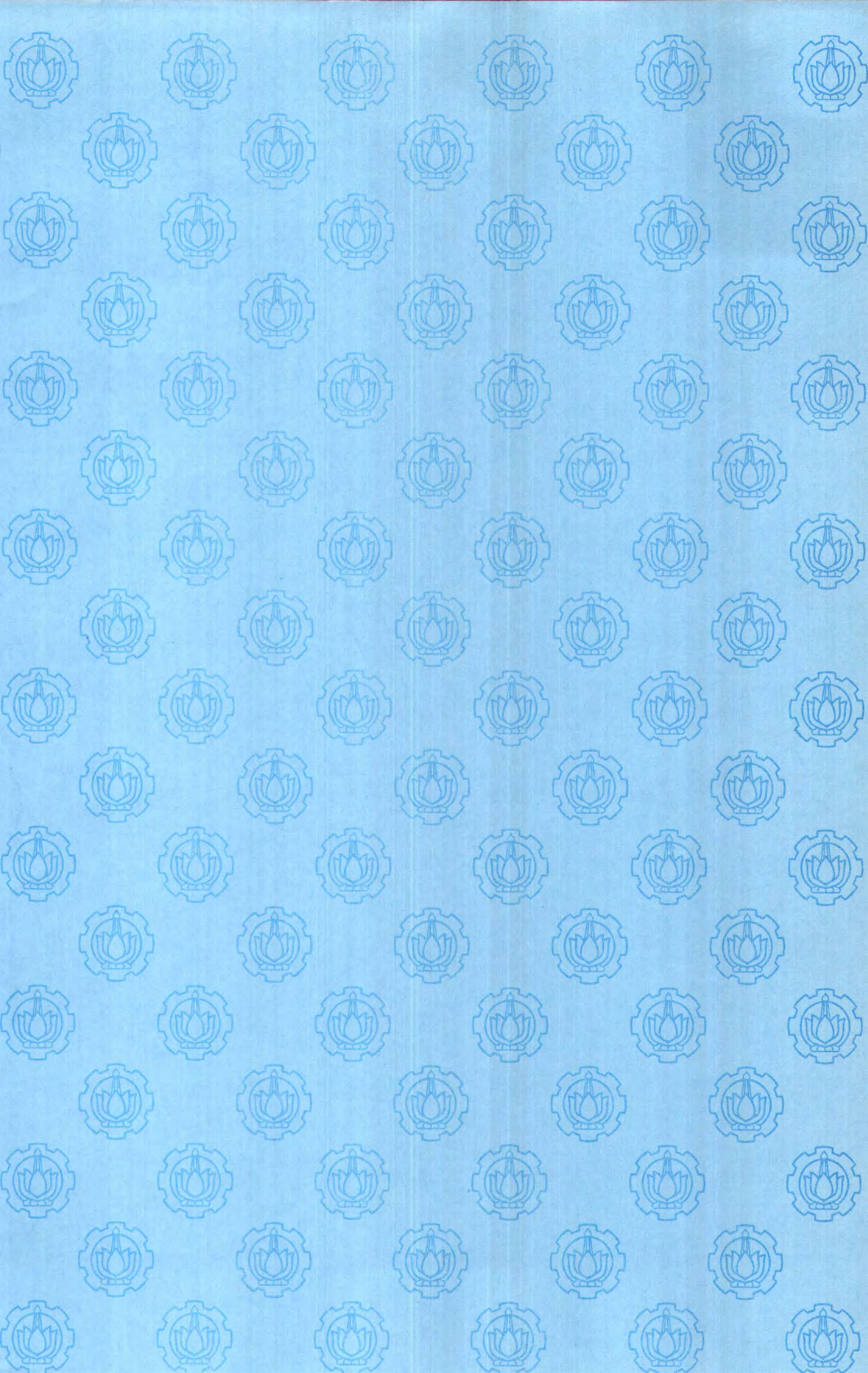
Blok diagram tersebut secara umum sama dengan blok diagram gambar 3.2. State-state feasible tetap dinyatakan dalam crisp, sedangkan fungsi obyektif dengan kriteria kendala beban dan spinning reserve dinyatakan dalam variabel fuzzy. Pada setiap state ditentukan nilai keanggotaan keputusan μ_D yang paling besar. Nilai μ_D tersebut mewakili biaya operasi sampai pada state sebanyak l yang memiliki nilai keanggotaan μ_D terbesar. Penyimpanan state tersebut bertujuan untuk pengambilan keputusan pada stage selanjutnya dan membentuk jalur guna memudahkan pada saat dilakukan back tracking. Total biaya operasi minimal pada stage terakhir dinyatakan oleh nilai keanggotaan terakhir μ_D yang paling besar.

Perbedaan utama antara pemrograman dinamis crisp dan pemrograman dinamis fuzzy terletak pada banyaknya ruang keputusan yang akan diseleksi. Pada

pemrograman dinamis crisp, ruang keputusan pada setiap jam adalah state-state dengan satu level beban dari hasil estimasi beban. Sedangkan pada pemrograman dinamis fuzzy, beban sistem adalah fuzzy sehingga harus ditentukan level-level beban tertentu yang bersesuaian dengan fungsi keanggotaan μ_D . Sehingga ruang keputusan pada setiap jam terdiri dari kelompok-kelompok dengan level beban tertentu. Setiap kelompok memiliki sejumlah state dengan μ_D yang sama dan satu level beban tertentu. Sebagai contoh, kelompok 1 dengan state 1, state2, ... dan state j memiliki satu level beban sebesar $L = L_{for} (1 + (\Delta I_i / 100))$, dan memiliki satu nilai μ_D yang sama. Untuk kelompok selanjutnya level beban bersesuaian dengan nilai keanggotaan μ_D .



Gambar 4.5 Algoritma Pemrograman Dinamis Fuzzy



BAB V
ANALISIS

5.1. Data Sistem

Algoritma pemrograman dinamis fuzzy diuji coba penerapannya pada sistem dengan 10 unit pembangkit thermal. Setiap unit memiliki karakteristik biaya bahan bakar yang direpresentasikan dengan fungsi kuadrat :

$$PCOST_1 (G_1 (H, J)) = a G_1 (H, J)^2 + b G_1 (H, J) + c (5. 1)$$

Karakteristik masing – masing unit diberikan pada tabel 5.1 dan tabel 5.2. Tabel 5.1 adalah data kapasitas pembangkitan unit beserta konstanta biaya bahan bakar. Pada Tabel 5.2 disebutkan minimum up time dan minimum down time tiap pembangkit, inisialisasi yang menyatakan lama waktu setiap unit pada kondisi shut down atau on line pada keadaan awal optimasi, dan status tiap pembangkit. Dalam simulasi ini hanya menggunakan status available yang siap untuk dijadwalkan shut down atau start up. Data beban sistem diberikan pada tabel 5.3.

TABEL 5.1 Data Kapasitas Unit Pembangkit dan Konstanta Biaya

Unit	G_i^{max} (MW)	G_i^{min} (MW)	a_i ($\$/MW^2$)	b_i ($\$/MW$)	c_i ($\$$)	Min up (Jam)	Min Down (Jam)	SCost _i
1	443.00	125.00	0.00140	1.1136	92.0000	8	5	50
2	550.00	250.00	0.00132	1.1265	110.0000	8	5	50
3	550.00	250.00	0.00135	1.1285	100.0000	5	3	50
4	520.00	250.00	0.00125	1.1354	115.0288	5	3	50
5	520.00	250.00	0.00481	1.1387	143.0288	5	3	50
6	443.00	125.00	0.00487	1.2136	143.5972	5	3	50
7	320.00	120.00	0.00152	1.2443	177.0573	8	5	50
8	320.00	120.00	0.00876	1.3272	81.1364	3	2	50
9	280.00	75.00	0.00895	1.3538	81.2980	3	2	50
10	280.00	75.00	0.00932	1.3805	81.6259	3	2	50

TABEL 5.2 Data Beban Sistem

Jam	Beban(MW)	Jam	Beban(MW)	Jam	Beban(MW)
1	2470	9	2200	17	2200
2	2370	10	2120	18	1550
3	2200	11	2200	19	1750
4	2100	12	2190	20	1900
5	1910	13	2050	21	2000
6	1950	14	2000	22	1900
7	2000	15	1980	23	3840
8	2150	16	1980	24	3680

5.2. Perbandingan Hasil Simulasi Pemrograman Dinamis Crisp dengan Pemrograman Dinamis Fuzzy

Simulasi operasi ekonomis sistem tenaga dengan metode pemrograman dinamis dilakukan dua tahap. Tahap pertama adalah dengan pendekatan crisp dan tahap kedua adalah dengan pendekatan fuzzy. Pada pendekatan crisp, level beban aktual sistem diasumsikan sama dengan level beban dari hasil studi estimasi beban. Sedangkan pada pendekatan fuzzy, level beban aktual sistem kita dekati, berdasarkan variabel linguistik deviasi beban yang telah didefinisikan dalam variabel fuzzy. Untuk setiap simulasi ditentukan besarnya spinning reserve sistem, yaitu sebesar 100 MW

Biaya start up dalam simulasi ini ditentukan sama untuk setiap unit yaitu sebesar \$ 50.0. Pada tabel 5.3 ditunjukkan hasil simulasi operasi ekonomis sistem tenaga dengan pendekatan crisp dan fuzzy. Pada simulasi dengan pendekatan fuzzy dipilih konstanta pembobot untuk fungsi keanggotaan μ_c , μ_l , dan μ_s pada jam tersebut yang masing-masing sebesar $\alpha = 3.512$, $\beta = 5.268$, $\delta = 2.33$.

TABEL 5.3.Perbandingan Biaya Operasi pada Simulasi dengan Pendekatan Fuzzy dan Pendekatan Crisp.

Jam	State	Beban(MW)		Biaya Produksi	
		CDP	FDP	CDP	FDP
1	0111111000	2570.00	2569.81	6283.61	6282.77
2	0111111000	2470.00	2469.82	5923.82	5923.33
3	0111101000	2300.00	2299.83	5204.91	5204.15
4	0111101000	2200.00	2199.84	4793.84	4793.27
5	0111101000	2010.00	2009.86	4248.52	4248.52
6	0111101000	2050.00	2049.85	4345.97	4345.52
7	0111101000	2100.00	2099.85	4481.07	4480.67
8	0111101000	2250.00	2249.84	2250.00	2249.68
9	0111101000	2300.00	2299.83	5204.91	5204.15
10	0111101000	2220.00	2219.84	4868.36	4867.75
11	0111101000	2300.00	2299.83	5204.91	5204.15
12	0111101000	2290.00	2289.84	2290.00	2289.73
13	0111101000	2150.00	2149.85	4627.59	4627.10
14	0111101000	2100.00	2099.85	4481.07	4480.67
15	0111101000	2080.00	2079.85	4429.28	4428.91
16	0111101000	2080.00	2079.85	4429.28	4428.91
17	0111101000	2300.00	2299.83	5204.91	5166.64
18	0111001000	1650.00	1649.88	3387.34	3387.13
19	0111001000	1850.00	1849.87	3807.04	3806.73
20	0111011000	2000.00	1999.86	4248.52	4248.21
21	0101111000	2100.00	2099.85	4481.07	4480.73
22	0111111000	2000.00	1999.86	4248.52	4248.23
23	0111111011	3940.00	3939.71	12798.66	12797.83
24	0111111101	3780.00	3779.72	11464.91	11464.22

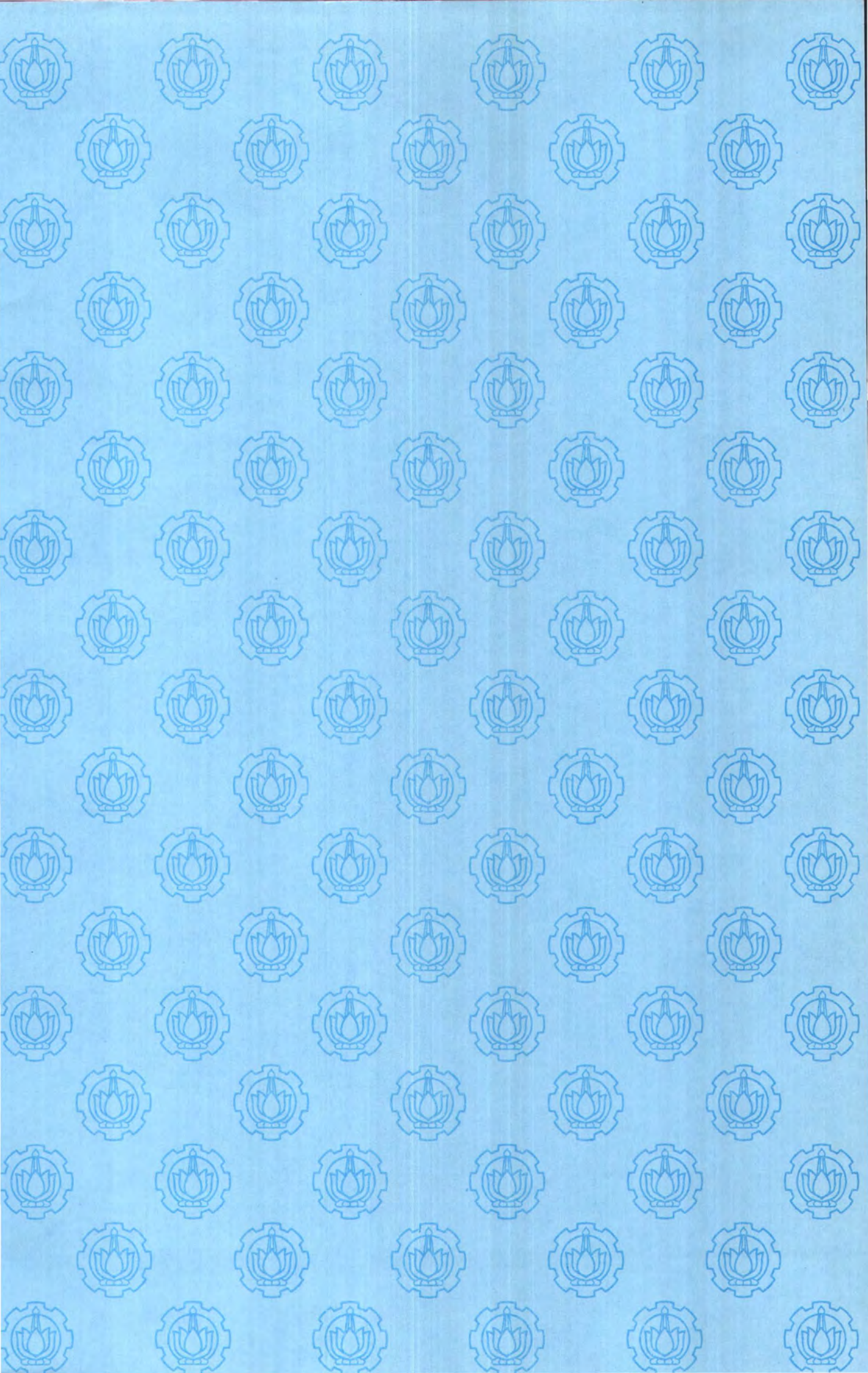


Dari table 5.3 terlihat bahwa hasil simulasi metode pendekatan fuzzy masih lebih ekonomis dibandingkan dengan metode pendekatan konvensional (crisp). Hal ini disebabkan karena perbedaan pembangkitan daya pada state feasible.

5.3 Analisis Sensitivitas

Fuzzifikasi bertujuan untuk mentransformasikan ketidak pastian nilai ke dalam ruang himpunan fuzzy yang disesuaikan dengan karakteristik masing – masing variabel dan operator himpunan fuzzy yang akan dipergunakan. Apabila kita

perhatikan kembali algoritma iterasi pemrograman dinamis fuzzy pada persamaan (4.9). Keputusan optimal operasi ekonomis sistem tenaga bergantung kepada fungsi keanggotaan μ_c , μ_1 , dan μ_s . Operator yang kita pergunakan adalah operator Max dan Min yang keduanya hanya membandingkan dua nilai besaran. Dengan demikian pemilihan fungsi keanggotaan μ_c , μ_1 , dan μ_s memerlukan pengujian agar dapat megambarkankan karakteristik sistem yang dimodelkan dan tujuan yang diinginkan. Untuk mengetahui pengaruh perubahan harga fungsi keanggotaan μ_c , μ_1 , μ_s melalui perubahan harga α , β , dan δ , maka perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan seksama.



BAB VI KESIMPULAN

Biaya operasi dalam operasi ekonomis sistem tenaga ditentukan melalui proses pengambilan keputusan yang bertahap. Dalam metode optimasi operasi ekonomis sistem tenaga, biaya yang diperoleh merupakan biaya prediksi hasil pendekatan melalui perhitungan dengan mengasumsikan besar beban sama dengan beban prediksi. Hal ini yang menyebabkan terjadinya penyimpangan akibat beban aktual tidak diketahui secara pasti.

Deviasi yang terjadi antara beban aktual dengan beban estimasi menyebabkan optimalisasi unit commitment melalui metode pemrograman dinamis belum mampu memberikan hasil optimal. Deviasi beban menyebabkan total pembangkitan daya pembangkit menyimpang dari jumlah kebutuhan beban yang akibatnya biaya operasi besarnya spinning reserve mengalami pergeseran. Untuk menjawab permasalahan tersebut dikembangkan metode pemrograman dinamis dalam lingkup fuzzy yang diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan dengan lebih baik. Dengan logika fuzzy, deviasi beban, spinning reserve, biaya operasi ditinjau dalam besaran fuzzy. Selanjutnya ketiga variable fuzzy dinyatakan dalam bentuk fungsi keanggotaan fuzzy guna mendukung proses pengambilan keputusan yang baik.

Pada pemrograman dinamis fuzzy, pembentukan fungsi keanggotaan ketiga variable tersebut didefinisikan sedemikian sehingga mampu menggambarkan karakteristik sistem sesuai dengan yang diharapkan. Fuzzifikasi diharapkan dapat membimbing pencarian solusi kearah optimal dengan memberikan nilai pembobot tinggi untuk solusi yang dikehendaki dan sebaliknya nilai pembobot rendah untuk solusi yang tidak optimal.

Secara umum dapat dilihat bahwa hasil optimasi dengan menggunakan programan dinamis fuzzy memberikan hasil yang lebih optimis. Namun demikian tulisan ini masih harus banyak dibenahi dan dikembangkan. Sampai tulisan ini disampaikan belum dapat memberikan gambaran tentang pengaruh perubahan harga fungsi keanggotaan melalui perubahan nilai fungsi pembobot. Untuk itu maka penulis sangat berharap pada waktu mendatang permasalahan unit commitment dengan metode pemrograman dinamis dapat dikembangkan dan diteliti lebih lanjut.

9. Allen J.W., Walenberg, B.F., "Power Generation , Operation and Control, Willey, 1984